

ISSN 2073-6185

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation

Том 52, № 4, 2025

# ВЕСТНИК

ДАГЕСТАНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

## ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ



Volume 52, No. 4, 2025

# HERALD

OF DAGHESTAN STATE TECHNICAL UNIVERSITY

## TECHNICAL SCIENCES

**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 52, № 4, 2025.**

# ВЕСТНИК

**ДАГЕСТАНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА.**

**ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ**

**Volume 52, No.4, 2025.**

# 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. Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ), доступный в интернете, по адресу <http://www.elibrary.ru> (Научная электронная библиотека). Категория 2. Белый список.

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», 2025.**

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.

The journal is included in the Russian Index of Scientific Citing (RISC) available on the Internet (<http://www.elibrary.ru> Scientific electronic library). Category 2. White list.

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; CyberLeninca, Microsoft Academic, Mendeley, Unpaywall.

**© Founder and Publisher Daghestan State Technical University, 2025**



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 52, № 4, 2025

**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>  
Редакционная коллегия:

**Научная рубрика «Энергетика и электротехника»**

Ответственный редактор: Евдулов О.В., д.т.н., доцент, ДГТУ, Махачкала, РФ.  
Ахмедов Г.Я., д.т.н., профессор, зав. кафедрой ДГТУ, 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 автоматки 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 ДГТУ, Махачкала, РФ.  
Андреев В.И., д.т.н., профессор, зав. каф. Национального исследовательского Московского государственного строительного университета, г. Москва, РФ.  
Давидюк А.Н., д.т.н., засл. строитель России, директор НИИЖБ им. АА.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.  
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](https://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 52, № 4 Махачкала, 2025. 248с.

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](mailto:vestnik.dgtu@mail.ru) Website: <http://vestnik.dgtu.ru/>

СОДЕРЖАНИЕ

|  |            |
|--|------------|
| <b>Энергетика и электротехника.....</b>  | <b>6</b>   |
| В.В. Чернявская, В.Б. Сапожников, А.В. Чернявский, М.А. Угольникова. Оценка энергетической эффективности установок разделения жидких сред методом вымораживания на основе анализа производства энтропии.....           | 6          |
| <b>Информационные технологии и телекоммуникации.....</b>   | <b>16</b>  |
| А.Т. Алдабеков, В.В. Терехнев, А.С. Зюкова. Разработка математической модели для оценки качества внедрения системы телеметрии в организационную структуру управления газодымозащитной службы.....                      | 16         |
| И.И. Андреев, С.О. Иванов, Т.Н. Копышева, М.В. Никандров, Т.Н. Смирнова. Интеграция и адаптация открытых средств мониторинга для обнаружения аномальной пользовательской активности в Astra Linux Special Edition..... | 23         |
| М.А. Арутюнян. Математическое моделирование оценки влияния размещения технических средств организации дорожного движения на безопасность.....  | 39         |
| Э.В. Бирих, И.И. Фадеев, Е.Н. Николаев, Д.В. Сахаров, П.А. Лужников. Оптимизация структуры ИСПДн объектов КИИ на основе теории рисков.....   | 49         |
| А.С. Глуханов. Метод расчёта индивидуального пожарного риска для крупного складского комплекса.....  | 63         |
| Н.В. Даценко, Л.А. Коробова, И.А. Матыцина. Применение алгоритмических процедур неточного вывода на основе нечетких знаний к решению прикладных задач.....   | 73         |
| А.Н. Земцов, М.А. Кузнецов, Гайс Мохаммед Салех Аль-Мерри. Анализ структурного сходства в оценке качества изображений.....   | 83         |
| А.П. Куликов, Е.А. Радаева, Д.О. Якупов. Эмуляция атак на компьютерные сети и их обнаружение с помощью Python.....   | 91         |
| И.И. Лившиц. Обеспечение реализации строительных проектов для нефтегазового комплекса на базе технологий искусственного интеллекта.....  | 99         |
| О.С. Логонова, М.Ю. Наркевич, В.Д. Корниенко. Блочный метод принятия решения о траектории обработки графической информации как основа искусственного интеллекта в автоматизированной системе мониторинга.....          | 106        |
| А.Д. Попов. Поиск неиспользуемого программного обеспечения в операционных системах LINUX.....  | 118        |
| С.В. Разумников. Разработка алгоритма и программного обеспечения для оценки альтернатив на основе метода аддитивной свертки критериев.....   | 125        |
| С.Э. Савзиханова, Т.И. Исабекова, Н.Э. Эминова. Цифровая трансформация: теоретико-методологический подход, драйверы и эффекты внедрения.....   | 137        |
| В.В. Соболева, П.Н. Садчиков. Разработка информационной системы поддержки и планирования предпроектных работ по газификации.....   | 147        |
| Л.Г. Тугашова, И.П. Ситдикова, Б.Н. Латипов. Методы планирования эксперимента в задачах моделирования и управления на примере объектов топливно-энергетического комплекса.....   | 154        |
| Т.А. Юрошева, Н.С. Исупов, Ш.Р. Кудзиев, Е.Н. Акоева. Автоматизация процесса армирования железобетонных конструкций в программе Autodesk Revit с использованием Dynamo Studio.....                                     | 165        |
| А.И. Янгиров, Е.А. Рогозин, П.М. Дуплякин, А.О. Ефимов. Метод сбалансированного распределения нагрузки на серверы информационных систем органов внутренних дел Российской Федерации.....                               | 181        |
| <b>Строительство и архитектура.....</b>  | <b>188</b> |
| Э.К. Агаханов, М.К. Агаханов, Е.В. Труфанова, Г.М. Муртазалиев. Использование параметрической поверхности диагонального переноса при проектировании большепролетного выставочного павильона.....                       | 188        |
| Т.А. Волосатова, А.Д. Мерзлякова, М.В. Беспалов, С.В. Литвинов, М.А. Магомедов. Численно-аналитическое моделирование ползучести пластин при изгибе.....  | 196        |
| В.С. Губский, М.В. Шамаров. Совершенствование теплового насоса методом эффективной утилизации теплоты.....   | 207        |
| Д.Ф. Карпов, М.В. Павлов, Е.В. Абрамова, В.К. Заикин. Разработка цифровых инструментов для расчета энергопотребления жилых зданий: отопление и горячее водоснабжение.....  | 214        |
| С.В. Полников. Методика статического расчета нелинейных мембранно-пневматических систем.....   | 225        |
| В.Е. Хапилин. Расчёт линзообразного покрытия мембранно-пневматического сооружения с учётом нелинейных факторов.....  | 232        |
| А.К. Юсупов, Х.М. Муселемов, Р.И. Вишталов, З.А. Гаджиев. Исследование числа разнотипных элементов фермы.....  | 238        |
| <b>Требования к оформлению статей.....</b>   | <b>247</b> |

**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 2 , N o . 4 , 2 0 2 5 .**

|   |   |
|---|---|
| <p><b>Editor-in-Chief:</b> Rasul M. Aliev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia;<br/> <a href="https://orcid.org/0000-0002-3061-4121">https://orcid.org/0000-0002-3061-4121</a></p>        | <p><b>Research areas</b></p>  |
| <p><b>Deputy Editor:</b> Aida M. Esetova, Dr. Sci. (Econom.), Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia;<br/> <a href="https://orcid.org/0000-0003-1093-5507">https://orcid.org/0000-0003-1093-5507</a></p>      | <p>2.4.8. Machines and devices, processes of refrigeration and cryogenic equipment (Technical Sciences),</p>    |
| <p><b>Editorial Board: Scientific rubric «Energy and Electrical Engineering»</b></p>  | <p>2.3.1. System analysis, management and information processing (Technical Sciences),</p>                      |
| <p><b>Executive editor:</b> Oleg V. Evdulov, Dr. Sci. (Eng.), Assoc. Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia;</p>  | <p>2.3.3. Automation and management of technological processes and production (Technical Sciences),</p>         |
| <p>Ganapi J. Akhmedov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia;</p>   | <p>2.3.4. Management in organizational systems (Technical Sciences),</p>  |
| <p>Alexander P. Ivanov, Dr. Sci. (Mathematics and Physics), Moscow Institute of Physics and Technology (State University), Dolgoprudny, Russia;</p>   | <p>1.2.2. Mathematical modeling, numerical methods and program complexes (Technical Sciences),</p>              |
| <p>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;</p> | <p>2.3.6. Methods and systems for information security, information security (Technical Sciences),</p>          |
| <p>Dmitry N. Kobzareno, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Joint Institute of High Temperatures RAS, Moscow, Russia;</p>   | <p>2.3.7. Computer modeling and design automation (Technical sciences)</p>                                      |
| <p>Alexander A. Krugljakov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, General Director Wissenschaftliche Beratung und Handelsvertretung, Germany;</p>   | <p>2.1.3. Heat supply, ventilation, air conditioning, gas supply and lighting (Technical Sciences),</p>         |
| <p>Vladimir M. Kutuzov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, President St. Petersburg Electrotechnical University «LETI», Saint-Petersburg, Russia;</p>  | <p>2.1.5. Building materials and products (Technical Sciences),</p>   |
| <p>Magomed Kh. Magomedov, Dr. Sci. (Mathematics and Physics), General Director, "SAUNO" Ltd. Moscow, Russia;</p>  | <p>2.1.9. Construction mechanics (Technical Sciences),</p>  |
| <p>Gadzhimet K. Safaraliyev, Dr. Sci. (Mathematics and Physics), Professor, Scientific Director of the «Microelectronics and Nanotechnology» Research Institute, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia;</p>             | <p>Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. Vol. 52, No.4</p>                        |
| <p>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;</p>   | <p>Makhachkala, 2025–248 p.</p>   |
| <p><b>Scientific rubric «Information Technology and Telecommunications»</b></p>   | <p>Published by Decision of the Academic Council Daghestan State Technical University</p>                       |
| <p><b>Executive editor:</b> Gromov Yu.Yu., Dr. Sci. (Eng.), Professor, Director of the Institute of Automation and Information Technologies, Tambov State Technical University, Tambov, Russia;</p>   | <p>Edition and Publisher Address: 70 I. Shamil Ave., Makhachkala, the Republic of Daghestan 367015, Russia.</p> |
| <p>Mahir M. Bashirov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Azerbaijan Technical University, Baku, Azerbaijan;</p>  | <p>Daghestan State Technical University Tel./fax (8722)623715 (8722)623964</p>                                  |
| <p>Arkady N. Larionov, Dr. Sci. (Economics), Professor, General Director LLC Research Center «Strategy», Moscow, Russia</p>   |   |
| <p>Igor E. Lobanov, Dr. Sci. (Eng.), Leading Researcher, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia;</p>  |   |
| <p>Mher V. Markosyan, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Director of Yerevan Research Institute of Communication Facilities, Yerevan, Republic of Armenia;</p>   |   |
| <p>Aslan G. Mustafayev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Dagestan State University of National Economy, Makhachkala, Russia.</p>   |   |
| <p>Eugene A. Rogozin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Voronezh Institute of the Ministry of the Interior of Russia, Voronezh, Russia;</p>   |   |
| <p>Tazhudin E. Sarkarov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia;</p>   |   |
| <p>Boris I. Shakhtarin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia</p>  |   |
| <p>Valery I. Finayev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department, Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia;</p>   |   |
| <p>Vyacheslav M. Khachumov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of laboratory, Institute for Systems Analysis of RAS, Moscow, Russia;</p>  |   |
| <p>Alexey G. Yakunin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department, Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia.</p>   |   |
| <p><b>Scientific rubric «Building and architecture» Executive editor:</b> Gadzhimurad N. Khadzhisalopov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia;</p>   |   |
| <p>Vladimir I. Andreev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russia;</p>  |   |
| <p>Alexey N. Davidyuk, Dr. Sci. (Eng.), Honored Builder of Russia, Director, Gvozdev NIIZHB, JSC «SIC Construction», Moscow, Russia;</p>  |   |
| <p>Vladimir G. Kazachek, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Senior researcher, Ataev Institute of Dwelling - NIPTIS Director of Mobile diagnostics in construction, Minsk, Republic of Belarus;</p>  |   |
| <p>Khasan N. Mazhiev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Millionshchikov Grozny State Oil Technical University, Grozny, Russia;</p>  |   |
| <p>Gregory V. Nesvetaev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of Construction Technologies Department, Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia;</p>   |   |
| <p>Batyr M. Yazyev, Dr. Sci. (Eng.), Advisor to RAASN, Professor of Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia.</p>  |   |
| <p><b>Editorial council</b></p>   |   |
| <p><b>Chairman of the editorial council:</b></p>  |   |
| <p>Boris A. Yakimovich, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Sevastopol State University, Institute of Nuclear Energy and Industry, Sevastopol, Russia.</p>  |   |
| <p><b>The co-chairs of the editorial council:</b></p>   |   |
| <p>Konstantin M. Ivanov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Rector, Ustinov Baltic State Technical University «VOENMECH», Saint-Petersburg, Russia;</p>  |   |
| <p>Vladimir M. Kutuzov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, President St. Petersburg Electrotechnical University «LETI», Saint-Petersburg, Russia;</p>  |   |
| <p><b>Members of the Editorial Board:</b></p>   |   |
| <p>Mustafa B.-O. Babanly, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Rector, Azerbaijan State University of Oil and Industry, Baku, Azerbaijan;</p>  |   |
| <p>Islam I. Djanzakov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Corresponding member, SRA RK, Academician of MANEB, Atyrau, Republic of Kazakhstan;</p>  |   |
| <p>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;</p>                                |   |

**CONTENTS**

|   |            |
|---|------------|
| <b>Energy and Electrical Engineering .....</b>  | <b>6</b>   |
| V.V. Chernyavskaya, V.B. Sapozhnikov, A.V. Chernyavsky, M.A. Ugolnikova. Assessment of the energy efficiency of liquid separation plants using the freeze-off method based on entropy production analysis .....   | 6          |
| <b>Information Technology and Telecommunications .....</b>  | <b>16</b>  |
| A.T. Aldabekov, V.V. Terebnev, A.S. Zyukova. Development of a mathematical model for assessing the quality of the implementation of a telemetry system into the organizational structure of the gas and smoke protection service.....                               | 16         |
| I.I. Andreev, S.O. Ivanov, T.N. Kopysheva, M.V. Nikandrov, T.N. Smirnova. Development of a mathematical model for assessing the quality of the implementation of a telemetry system into the organizational structure of the gas and smoke protection service ..... | 23         |
| M.A. Arutiunian. Mathematical modeling of the assessment of the impact of placement of technical means of road traffic organization on safety .....   | 39         |
| E.V. Birikh, I.I. Fadeev, E.N. Nikolaev, D.V. Sakharov, P.A. Luzhnikov. Optimization of the structure of the information system of personal data of critical information infrastructure objects based on risk theory.....   | 49         |
| A.S. Glukhanov. Method for calculating individual fire risk for a large warehouse complex .....   | 63         |
| N.V. Datsenko, L. A. Korobova, I.A. Matytsina. Application of algorithmic procedures of imprecise inference based on fuzzy knowledge to the solution of applied problems .....  | 73         |
| A.N. Zemtsov, M.A. Kuznetsov, Ghaith Mohammed Saleh Al-Merri. Analysis of Structural Similarity in Image Quality Assessment .....   | 83         |
| A.P. Kulikov, E.A. Radaeva, D.O. Yakupov. Emulating and Detecting Computer Network Attacks Using Python.....  | 91         |
| I.I. Livshits. Supporting the implementation of construction projects for the oil and gas industry using artificial intelligence technologies .....   | 99         |
| O.S. Logunova, M.Yu. Narkevich, V.D. Kornienko. Block method of decision making on the trajectory of graphic information processing as a basis for artificial intelligence in an automated monitoring system.....   | 106        |
| A.D. Popov. Finding Unused Software in Linux Operating Systems.....   | 118        |
| S.V. Razumnikov. Development of an Algorithm and Software for Evaluating alternatives based on the Method of additive Convolution of Criteria .....   | 125        |
| S.E. Savzikhanova, T.I. Isabekova, N.E. Eminova. Digital Transformation: A Theoretical and Methodological Approach, Drivers and Effects of Implementation.....  | 137        |
| V.V. Soboleva, P.N. Sadchikov. Development of an information system to support and plan pre-project work on gasification .....  | 147        |
| L.G. Tugashova, I.P. Sitdikova, B.N. Latipov. Methods of Experimental Design in Modeling and Control Tasks Illustrated by Fuel and Energy Complex Facilities .....  | 154        |
| T.A. Yurosheva, N.S. Ispov, Sh.R. Kudziev, E.N. Akoeva. Automation of the reinforcement of reinforced concrete structures in the Autodesk Revit program using Dynamo Studio.....  | 165        |
| A.I. Yangirov, E.A. Rogozin, P.M. Duplyakin, A.O. Efimov. The method of balanced load distribution on the servers of information systems of the internal affairs bodies of the Russian Federation.....  | 181        |
| <b>Building and Architecture .....</b>  | <b>188</b> |
| E.K. Agakhanov, M.K. Agakhanov, E.V. Trufanova, G.M. Murtazaliev. The use of a parametric diagonal transfer surface in the design of a large-span exhibition pavilion .....   | 188        |
| T.A. Volosatova, A.D. Merzliakova, M.V. Bepalov, S.V. Litvinov, M.A. Magomedov. Numerical and analytical modeling of plate creep under bending .....  | 196        |
| V.S. Gubsky, M.V. Shamarov. Improvement of the heat pump by the method of efficient heat utilization.....   | 207        |
| D.F. Karpov, M.V. Pavlov, E.V. Abramova, V.K. Zaikin. Development of digital tools for calculating the energy consumption of residential buildings: heating and domestic hot water .....  | 214        |
| S.V. Polnikov. Method for static calculation of non-linear membrane-pneumatic systems.....  | 225        |
| V.E. Khapilin. Calculation of the lens-shaped coating of a membrane-pneumatic structure taking into account nonlinear factors .....   | 232        |
| A.K. Yusupov, Kh.M. Muselemov, R.I. Vishtalov, Z.A. Gadzhiev. Study of the number of different types of truss elements.....   | 238        |
| <b>Formatting requirements for papers .....</b>   | <b>247</b> |

**Оценка энергетической эффективности установок разделения жидких сред методом вымораживания на основе анализа производства энтропии**

**В.В. Чернявская, В.Б. Сапожников, А.В. Чернявский, М.А. Угольникова**

Московский политехнический университет,  
107023, г. Москва, ул. Большая Семёновская, 38, Россия

**Резюме. Цель.** Целью исследования является разработка методики оценки энергетической эффективности установок разделения жидких сред методом вымораживания объемного принципа действия на основе анализа производства энтропии. На основании разработанной методики дать оценку целесообразности применения ступени предварительного охлаждения исходного жидкого продукта в криоконцентраторах объемного принципа действия. **Метод.** Исследование основано на методе энтропийного анализа термодинамических циклов холодильных установок. Произведен теоретический расчет по разработанной методике для криоконцентраторов, оснащенных ступенью предварительного охлаждения исходного жидкого продукта и без нее. **Результат.** Показано, что наличие ступени предварительного охлаждения, которая основывается на безмашинном охлаждении исходного жидкого продукта за счет холода массы льда, получаемой в аппарате, является целесообразным и позволяет существенно сократить энергопотребление криоконцентратора. Представлены результаты расчета удельного показателя энергопотребления криоконцентратора, характеризующего затраты электроэнергии на производство одного литра концентрата в зависимости от наличия ступени предварительного охлаждения исходного жидкого продукта для хладагентов R404A, R410A, R507. **Вывод.** Разработанная методика оценки энергетической эффективности установок разделения жидких сред методом вымораживания на основе анализа производства энтропии может быть полезна не только для проектирования устройств криоконцентрирования, но и другого оборудования объемного принципа действия, работающего в условиях ледообразования, например, ледогенераторов и холодоаккумуляторов.

**Ключевые слова:** энтропийный метод анализа, криоконцентратор, энергопотребление, вымораживание, термодинамический цикл, концентрат

**Для цитирования:** В.В. Чернявская, В.Б. Сапожников, А.В. Чернявский, М.А. Угольникова. Оценка энергетической эффективности установок разделения жидких сред методом вымораживания на основе анализа производства энтропии. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025;52(4):6-15. DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-4-6-15.

**Assessment of the energy efficiency of liquid separation plants using the freeze-off method based on entropy production analysis**

**V.V. Chernyavskaya, V.B. Sapozhnikov, A.V. Chernyavsky, M.A. Ugolnikova**

Moscow Polytechnic University,  
38 Bolshaya Semyonovskaya Str., Moscow 107023, Russia

**Abstract. Objective.** The objective of the study is to develop a methodology for assessing the energy efficiency of liquid separation plants using the freeze-off method based on entropy production analysis. Based on the developed methodology, assess the feasibility of using a preliminary cooling stage for the initial liquid product in cryoconcentrators based on the volumetric principle of operation. **Method.** The study is based on the method of entropy analysis of thermodynamic cycles of refrigeration units. A theoretical calculation was performed using the developed methodology for cryoconcentrators equipped with and without a preliminary cooling stage for the

initial liquid product. **Result.** It was shown that the presence of a pre-cooling stage, which is based on machine-free cooling of the initial liquid product using the cold of the ice mass obtained in the apparatus, is expedient and allows for a significant reduction in the energy consumption of the cryoconcentrator. The results of calculating the specific energy consumption of the cryoconcentrator, which characterizes the energy consumption for the production of one liter of concentrate, depending on the presence of a preliminary cooling stage of the initial liquid product for refrigerants R404A, R410A, and R507, are presented. **Conclusion.** The developed method for assessing the energy efficiency of liquid separation plants using the freeze-out method based on entropy production analysis can be useful not only for designing cryoconcentration devices, but also for other volumetric equipment operating under ice formation conditions, such as ice generators and cold accumulators.

**Keywords:** entropy analysis method, cryoconcentrator, energy consumption, freezing, thermodynamic cycle, concentrate

**For citation:** V.V. Chernyavskaya, V.B. Sapozhnikov, A.V. Chernyavsky, M.A. Ugolnikova. Assessment of the energy efficiency of liquid separation plants using the freeze-off method based on entropy production analysis. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2025;52(4):6-15. (In Russ) DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-4-6-15

**Введение.** Одной из перспективных технологий в современной холодильной технике является разделение жидких сред методом вымораживания. Данный способ разделения жидких сред применяется в пищевой, фармакологической, биотехнологической, химической отраслях промышленности [1-5]. При проектировании установок разделения жидких сред методом вымораживания одной из основных задач является повышение их энергоэффективности. Для решения данной задачи необходимы методики, позволяющие оценить влияние новых технических решений на энергетическую эффективность данных устройств.

**Постановка задачи.** Многие авторитетные специалисты в области техники низких температур отмечают [6-11], что наиболее совершенные методики оценки энергетической эффективности холодильного оборудования базируются на анализе производства энтропии. В связи с этим актуальной является разработка методики оценки энергетической эффективности устройств разделения жидких сред методом вымораживания на основе энтропийного метода анализа.

**Методы исследования.** В работе предложена методика и произведен оценочный расчет энергетической эффективности криоконцентратора объемного принципа действия, оборудованного ступенью предварительного охлаждения и без неё. Криоконцентратор объемного принципа действия, оснащенный ступенью предварительного охлаждения представлен на рис. 1 [12].

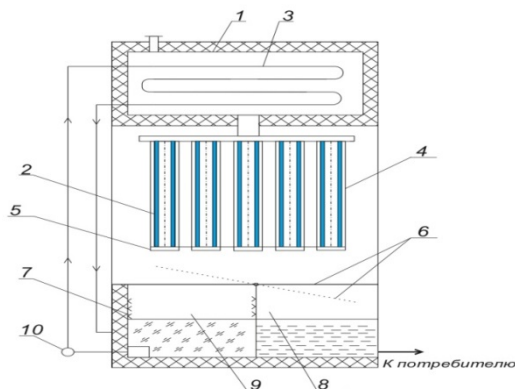


Рис. 1 – Криоконцентратор объемного принципа действия, оснащенный ступенью предварительного охлаждения

Fig. 1 – A volumetric cryoconcentrators equipped with a pre-cooling stage

В представленном криоконцентраторе разделительное вымораживание исходного жидкого продукта происходит внутри теплообменных труб 2, оснащенных охлаждающей рубашкой 4, внутри которой циркулирует охлаждающая среда. По достижению слоем льда заданной толщины намораживание завершается, поворотный стол 6 занимает соответствующее положение, открываются крышки 5 и полученный концентрат сливается в бак 8.

Затем поворотный стол занимает противоположное положение и начинается процесс оттайки льда, который заключается в подплавлении слоя льда, граничащего с теплообменной трубой, после чего лед благодаря собственному весу отделяется от труб и попадает в бак сборник льда 9.

Отличительной особенностью представленного аппарата является ступень предварительного охлаждения, состоящая из теплоизолированного бака 1, теплообменного аппарата 3, насоса 10 и форсунок 7. За счет циркуляции воды в ступени предварительного охлаждения происходит безмашинное охлаждение исходного жидкого продукта при помощи холодоаккумулирующей массы льда, получаемого в аппарате.

Исходя из геометрических размеров аппарата и рекомендованных режимов концентрирования для различных жидких продуктов [13-17], можно определить следующие параметры аппарата за цикл его работы: объем подаваемого в теплообменные трубы исходного жидкого продукта  $V_{ижп}$ , объем получаемого концентрата  $V_{конц}$  и массу образующегося льда  $m_{л}$ .

Общее время цикла концентрирования  $\tau_{ц}$  включает в себя время охлаждения  $\tau_{охл}$  [18] исходного жидкого продукта в теплообменной трубе от начальной температуры  $T_{н.ижп}$  до температуры кристаллизации воды  $T_{ф}$  и время образования слоя льда  $\tau_{зам}$  [19] заданной толщины  $\delta_{л}$ .

При расчете количества тепла, которое необходимо отвести от исходного жидкого продукта, нужно учитывать три составляющие:

– теплота, отводимая при охлаждении исходного жидкого продукта  $E_{охл}$  от начальной температуры до температуры кристаллизации воды:

$$E_{охл} = V_{ижп} \rho_{ижп} \cdot C_{р\ ижп} (T_{н\ ижп} - T_{ф}), \text{ Дж} \quad (1)$$

где:  $\rho_{ижп}$  – плотность исходного жидкого продукта;  $C_{р\ ижп}$  – теплоемкость исходного жидкого продукта;

– теплота, отводимая при фазовом превращении воды в лед  $E_{зам}$ :

$$E_{зам} = m_{л} \cdot L, \text{ Дж} \quad (2)$$

где  $L$  – скрытая теплота фазового перехода воды в лед.

– теплота, отводимая при охлаждении льда  $E_{пер.л}$  ниже температуры замерзания:

$$E_{пер.л} = m_{л} C_{р\ л} (T_{ф} - T_{л.ср}), \text{ Дж} \quad (3)$$

где  $C_{р\ л}$  – теплоемкость льда, намороженного за цикл работы аппарата, Дж/кгК;

$T_{л.ср}$  – средняя температура льда:

$$T_{л.ср} = \frac{T_{ф} + T_{ст}}{2}, \text{ К} \quad (4)$$

где  $T_{ст}$  – температура стенки теплообменной трубы.

Необходимую холодопроизводительность установки целесообразно определять отдельно для стадии охлаждения и стадии замораживания:

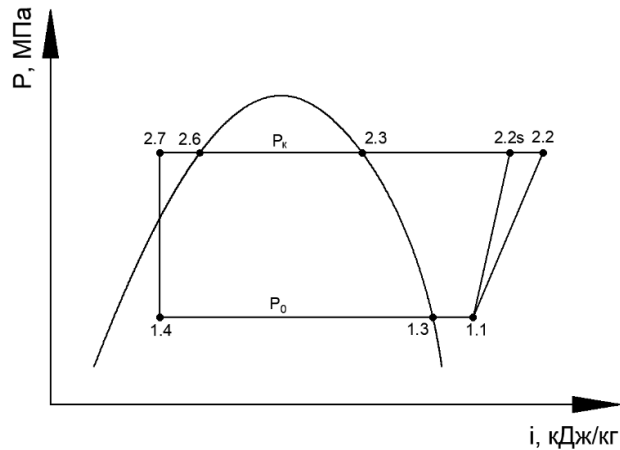
- для стадии охлаждения

$$Q_{0\ охл} = \frac{E_{охл}}{\tau_{охл}}, \text{ Вт} \quad (5)$$

- для стадии замораживания

$$Q_{0\ зам} = \frac{E_{зам} + E_{пер.л}}{\tau_{зам}}, \text{ Вт} \quad (6)$$

Удельная массовая холодопроизводительность  $q_0$  определяется в соответствии с термодинамическим циклом (рис. 2).



**Рис. 2 – Одноступенчатый термодинамический цикл в P-I диаграмме для парокомпрессионной холодильной машины**  
**Fig. 2 – A single-stage thermodynamic cycle in a P-I diagram for a vapor-compression refrigeration system**

Отсюда следует, что массовый расход холодильного агента  $G_{ха}$  для разных стадий работы криоконцентратора будет отличаться [20]:

- для стадии охлаждения

$$G_{ха\ охл} = \frac{Q_{0\ охл}}{q_0}, \text{ кг/с} \quad (7)$$

- для стадии замораживания

$$G_{ха\ зам} = \frac{Q_{0\ зам}}{q_0}, \text{ кг/с} \quad (8)$$

Стоит отметить, что для криоконцентраторов, работающих в условия непосредственного кипения хладагента в аппарате и с применением вторичного контура по хладоносителю будут отличаться минимальная работа сжатия компрессора и необходимые удельные затраты работы сжатия для компенсации производства энтропии в испарителе.

*Для устройств с непосредственным кипением:*

- удельная работа на стадии охлаждения:

$$l_{км, \min\ охл} = q_0 \cdot \frac{T_{ижп.ср} - T_{\phi}}{T_{\phi}}, \text{ Дж/кг} \quad (9)$$

где  $T_{ижп.ср}$  – среднелогарифмическая температура исходного жидкого продукта:

$$T_{ижп.ср} = \frac{T_{н.ижп.н} - T_{\phi}}{\ln \frac{T_{н.ижп.н}}{T_{\phi}}}, \text{ К} \quad (10)$$

- необходимые удельные затраты работы сжатия для компенсации производства энтропии в испарителе для стадии охлаждения:

$$\Delta l_{и\ охл} = (i_{1.3} - i_{1.4}) \cdot T_{ижп.ср} \cdot \left( \frac{T_{\phi} - T_0}{T_{\phi} \cdot T_0} \right), \text{ Дж/кг} \quad (11)$$

- удельная работа на стадии замораживания:

$$l_{км, \min\ зам} = q_0 \cdot \frac{T_{\phi} - T_{л.ср}}{T_{л.ср}}, \text{ Дж/кг} \quad (12)$$

где  $T_{л.ср}$  – среднелогарифмическая температура льда:

$$T_{л.ср} = \frac{T_{\phi} - T_0}{\ln \frac{T_{\phi}}{T_0}}, \text{ К} \quad (13)$$

- необходимые удельные затраты работы сжатия для компенсации производства энтропии в испарителе на стадии замораживания:

$$\Delta l_{и\ зам} = (i_{1.3} - i_{1.4}) \cdot T_{\phi} \cdot \left( \frac{T_{л.ср} - T_0}{T_{л.ср} \cdot T_0} \right), \text{ Дж/кг} \quad (14)$$

*Для устройств с вторичным контуром по хладоносителю:*

- удельная работа на стадии охлаждения:

$$l_{км, \min\ охл} = q_0 \cdot \frac{T_{хс\ вход1} - T_{хс\ выход}}{T_{хс\ выход}}, \text{ Дж/кг} \quad (15)$$

где  $T_{\text{хс.вход1}}$  – температура хладоносителя на входе в испаритель (принимается на 3-5 К ниже средней температуры исходного жидкого продукта  $T_{\text{ижп.ср}}$ ), К;

$T_{\text{хс.выход}}$  – температура хладоносителя на выходе из испарителя (принимается на 2-3 К ниже, чем рекомендованная температура  $T_{\text{ст}}$  [13-17]), К.

- необходимые удельные затраты работы сжатия для компенсации производства энтропии в испарителе для стадии охлаждения:

$$\Delta l_{\text{и охл}} = (i_{1.3} - i_{1.4}) \cdot T_{\text{хс.вход1}} \cdot \left( \frac{T_{\text{хс.выход}} - T_0}{T_{\text{хс.выход}} \cdot T_0} \right), \text{ Дж/кг} \quad (16)$$

- удельная работа на стадии замораживания:

$$l_{\text{км, min зам}} = q_0 \cdot \frac{T_{\text{хс.вход2}} - T_{\text{хс.выход}}}{T_{\text{хс.выход}}}, \text{ Дж/кг} \quad (17)$$

где  $T_{\text{хс.вход2}}$  – температура хладоносителя на входе в испаритель (принимается на 2-3 К ниже среднелогарифмической температуры льда  $T_{\text{л ср.2}}$ ), К:

$$T_{\text{л ср.2}} = \frac{T_{\text{ф}} - T_{\text{ст}}}{\ln \frac{T_{\text{ф}}}{T_{\text{ст}}}}, \text{ К} \quad (18)$$

- необходимые удельные затраты работы сжатия для компенсации производства энтропии в испарителе на стадии замораживания:

$$\Delta l_{\text{и зам}} = (i_{1.3} - i_{1.4}) \cdot T_{\text{хс.вход2}} \cdot \left( \frac{T_{\text{хс.выход}} - T_0}{T_{\text{хс.выход}} \cdot T_0} \right), \text{ Дж/кг} \quad (19)$$

Необходимые удельные затраты работы сжатия в компрессоре при перегреве  $\Delta l_{\text{пер}}$ , дросселировании  $\Delta l_{\text{др}}$  и конденсации  $\Delta l_{\text{кд}}$  хладагента для криоконцентраторов, работающих в условиях непосредственного кипения хладагента в аппарате и с применением вторичного контура по хладоносителю будут рассчитываться по следующим выражениям [21]:

$$\Delta l_{\text{пер}} = T_{\text{ос}} \cdot (s_{1.1} - s_{1.3}) - (i_{1.1} - i_{1.3}), \text{ Дж/кг} \quad (20)$$

$$\Delta l_{\text{др}} = T_{\text{ос}} \cdot (s_{1.4} - s_{2.7}), \text{ Дж/кг} \quad (21)$$

$$\Delta l_{\text{кд}} = \Delta l_{\text{пк}} + \Delta l_{\text{кк}}, \text{ Дж/кг} \quad (22)$$

где  $\Delta l_{\text{пк}}$  – необходимые удельные затраты работы для компенсации производства энтропии при охлаждении паров хладагента до температуры насыщения:

$$\Delta l_{\text{пк}} = (i_{2.2} - i_{2.3}) - T_{\text{ос}} \cdot (s_{2.2} - s_{2.3}), \text{ Дж/кг} \quad (23)$$

$\Delta l_{\text{кк}}$  – необходимые удельные затраты работы для компенсации производства энтропии при конденсации паров хладагента в конденсаторе:

$$\Delta l_{\text{кк}} = T_{\text{ос}} \cdot (i_{2.3} - i_{2.7}) \cdot \left( \frac{1}{T_{\text{ос}}} - \frac{1}{T_{\text{к}}} \right), \text{ Дж/кг} \quad (24)$$

Величину работы сжатия находим отдельно для каждой стадии работы криоконцентратора

- для стадии охлаждения

$$l_{\text{км охл}} = l_{\text{км, min охл}} + \Delta l_{\text{и охл}} + \Delta l_{\text{пер}} + \Delta l_{\text{др}} + \Delta l_{\text{кд}}, \text{ Дж/кг} \quad (25)$$

- для стадии замораживания

$$l_{\text{км зам}} = l_{\text{км, min зам}} + \Delta l_{\text{и зам}} + \Delta l_{\text{пер}} + \Delta l_{\text{др}} + \Delta l_{\text{кд}}, \text{ Дж/кг} \quad (26)$$

Энергопотребление холодильной установки за цикл работы можно выразить как:

$$W_{\text{км}} = (l_{\text{км}} \cdot G_{\text{ха}} \cdot \tau)_{\text{охл}} + (l_{\text{км}} \cdot G_{\text{ха}} \cdot \tau)_{\text{зам}}, \text{ Дж} \quad (27)$$

Для криоконцентраторов, оснащенных ступенью предварительного охлаждения исходного жидкого продукта необходимо принимать во внимание энергопотребление циркуляционного насоса за цикл работы установки:

$$W_{\text{нас}} = P_{\text{нас}} \cdot \tau_{\text{ц}}, \text{ Дж} \quad (28)$$

где  $P_{\text{нас}}$  – мощность циркуляционного насоса, Дж/с.

Оценку энергетической эффективности криоконцентратора будем проводить по удельному показателю энергопотребления, характеризующему количество затраченной энергии на производство 1 литра концентрата:

$$w_{\text{уд}} = \frac{W_{\text{км}} + W_{\text{нас}}}{V_{\text{конц}}}, \frac{\text{Дж}}{\text{л}} \quad (29)$$

Отметим, что в случае отсутствия ступени предварительного охлаждения слагаемое  $W_{\text{нас}}$  в уравнении (29) также отсутствует.

**Обсуждение результатов.** По разработанной методике авторами была выполнена сравнительная оценка энергоэффективности криоконцентратора с вторичным контуром по хладоносителю, оснащенного ступенью предварительного охлаждения и без нее. Расчет произведен по следующим исходным данным. Исходный жидкий продукт – вишневый сок с температурой  $T_{\text{ижп}} = 293$  К. Доля вымораживаемой влаги  $\varphi = 0,55$ , температура стенки кристаллизатора  $T_{\text{ст}} = 268$  К [15]. Необходимая производительность аппарата  $\Pi = 50$  л/ч. Теплообменная труба кристаллизатора: диаметр - 85x2,5, длина -  $H_{\text{тр}} = 1$  м, материал - нержавеющая пищевая сталь 08X18N10T, диаметр корпуса аппарата кристаллизатора - 114x3. Хладоноситель – пропиленгликоль. Холодильный агент - R404A. Температура исходного жидкого продукта, поступающего в теплообменные трубы, составляет  $T_{\text{н.ижп}} = 278$  К и  $T_{\text{н.ижп}} = 293$  К в зависимости от наличия ступени предварительного охлаждения. В соответствии с рекомендациями по концентрированию вишневого сока и принятыми геометрическими размерами теплообменной трубы расчетная толщина слоя льда для указанных выше случаев:  $\delta_{\text{л}} = 0,0132$  м. Время необходимое для цикла концентрирования представлено в табл. 1.

**Таблица 1. Время цикла концентрирования**

**Table 1. Concentration cycle time**

| $T_{\text{н.ижп}}, \text{К}$ | Время охлаждения, $\tau_{\text{охл}}, \text{с}$ | Время замораживания, $\tau_{\text{зам}}, \text{с}$ | Общее время цикла $\tau_{\text{ц}}, \text{с}$ |
|------------------------------|---|--|---|
| 278                          | 351   | 5060   | 5411  |
| 293                          | 814   | 5060   | 5874  |

Для обеспечения заданной производительности криоконцентратора понадобится 34 и 37 теплообменных труб в зависимости от наличия ступени предварительного охлаждения. Результаты расчета необходимой холодопроизводительности представлены в табл. 2.

**Таблица 2. Необходимая холодопроизводительность**

**Table 2. Required cooling capacity**

| $T_{\text{н.ижп}}, \text{К}$ | $Q_{0 \text{ охл}}, \text{кВт}$ | $Q_{0 \text{ зам}}, \text{кВт}$ |
|------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 278                          | 9,9                             | 5,1                             |
| 293                          | 18,3                            | 6,3                             |

С целью проведения дальнейшего анализа был произведен расчет параметров узловых точек термодинамического цикла. Расчет произведен в соответствии со следующими данными: холодильный агент R404A, температура кипения  $-12^{\circ}\text{C}$ , температура конденсации  $+45^{\circ}\text{C}$ , перегрев 10 К, переохлаждение 5 К. Результаты расчета представлены в табл. 3.

**Таблица 3. Параметры холодильного агента R404A в узловых точках цикла**

**Table 3. Parameters of refrigerant R404A at key points in the cycle**

| Точка | Давление<br>$P, \text{МПа}$ | Температура<br>$T, \text{К}$ | Энтальпия<br>$i, \text{кДж/кг}$ | Энтропия<br>$s, \text{кДж/кг}\cdot\text{К}$ |
|-------|-----------------------------|------------------------------|---------------------------------|---|
| 1.4   | 0,4                         | 263                          | 259                             | 1,23  |
| 1.3   | 0,4                         | 263                          | 360                             | 1,614                                       |
| 1.1   | 0,4                         | 271                          | 369                             | 1,648                                       |
| 2.2   | 2,04                        | 341                          | 412                             | 1,674                                       |
| 2.2s  | 2,04                        | 334                          | 403                             | 1,648                                       |
| 2.3   | 2,04                        | 318                          | 381                             | 1,579                                       |
| 2.6   | 2,04                        | 318                          | 268                             | 1,226                                       |
| 2.7   | 2,04                        | 313                          | 259                             | 1,199                                       |

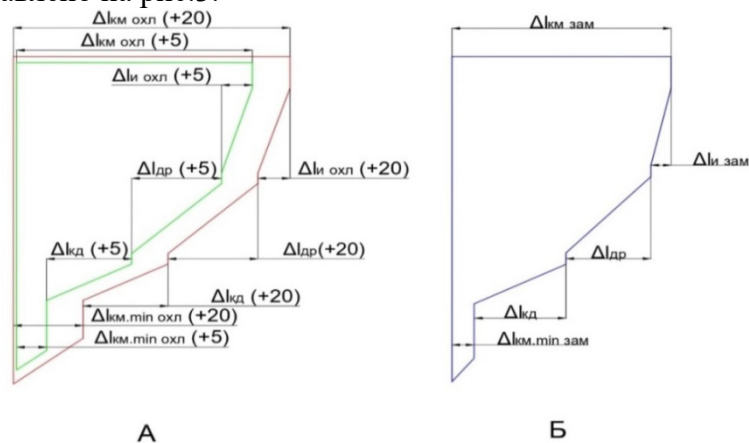
Значения удельных затрат работы на компенсацию производства энтропии в элементах холодильной установки представлены в табл.4.

**Таблица 4. Удельные затраты работы на компенсацию производства энтропии в элементах холодильной установки**

**Table 4. Specific energy consumption for entropy compensation in refrigeration system components**

| R404A  | 278 К | 293 К |
|--|-------|-------|
| Удельная работа для производства холода при охлаждении исходного жидкого продукта $\Delta l_{\text{км. min охл}}$ , кДж/кг/ specific work for the production of cold during cooling of the initial liquid product  | 1,707 | 4,512 |
| Удельная работа для производства холода при ледообразовании и переохлаждении льда $\Delta l_{\text{км. min зам}}$ , кДж/кг / specific work for the production of cold during ice formation and supercooling of ice   | 0,567 | 0,567 |
| Удельные затраты работы сжатия для компенсации производства энтропии в конденсаторе $\Delta l_{\text{кд}}$ /specific costs of compression work to compensate for the production of entropy in the condenser  | 10,36 | 10,36 |
| Удельные затраты работы сжатия для компенсации производства энтропии при дросселировании $\Delta l_{\text{др}}$ , кДж/кг/ specific costs of compression work to compensate for entropy production during throttling  | 9,238 | 9,238 |
| Удельные затраты работы сжатия для компенсации производства энтропии в испарителе при охлаждении исходного жидкого продукта $\Delta l_{\text{и охл}}$ , кДж/кг/ specific costs of compression work to compensate for the production of entropy in the evaporator when cooling the initial liquid product | 1,968 | 2,021 |
| Удельные затраты работы сжатия для компенсации производства энтропии в испарителе при ледообразовании $\Delta l_{\text{и зам}}$ , кДж/кг/ specific costs of compression work to compensate for the production of entropy in the evaporator during ice formation  | 1,946 | 1,946 |
| Удельные затраты работы сжатия для компенсации производства энтропии при перегреве хладагента $\Delta l_{\text{пер}}$ , кДж/кг/ specific costs of compression work to compensate for the production of entropy during superheating of the refrigerant  | 1,132 | 1,132 |
| Суммарная работа на стадии охлаждения $\Delta l_{\text{км охл}}$ , кДж/кг/ Total work at the cooling stage   | 24,41 | 27,27 |
| Суммарная работа на стадии заморозания $\Delta l_{\text{км зам}}$ , кДж/кг/ Total work at the freezing stage   | 23,25 | 23,25 |

Графически распределение работ на компенсацию энтропии в элементах холодильной установки представлено на рис.3.



**Рис. 3 – Расчетное распределение работ на компенсацию энтропии в элементах холодильной установки: А- охлаждение (зеленая линия+5; красная линия +20), Б – заморозание**

**Fig. 3 – Calculated distribution of work for entropy compensation in the refrigeration system components A - cooling (green line +5; red line +20), Б – freezing**

Принимая во внимание изменение необходимой холодопроизводительности установки на стадии охлаждения и стадии замораживания, произведем расчет расхода хладагента и энергопотребления холодильной установки за цикл работы (табл. 5).

Для реализации циркуляции воды в ступени предварительного охлаждения выбран циркуляционный насос с мощностью 35 Дж/с. Энергопотребление выбранного циркуляционного насоса за один цикл концентрирования составит  $W_{\text{нас.р}} = 189385$  Дж

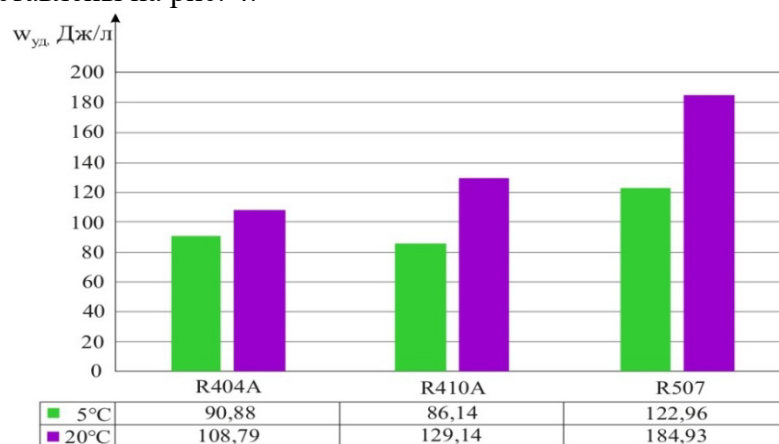
**Таблица 5. Массовый расход холодильного агента и энергопотребление холодильной установки**

**Table 5. Refrigerant mass flow rate and energy consumption of the refrigeration system**

| $T_{н.ижп}, K$ | $G_{ха\ охл}, кг/с$ | $G_{ха\ зам}, кг/с$ | $W_{км}, кДж$ |
|----------------|---------------------|---------------------|---------------|
| 278            | 0,098               | 0,05                | 6779          |
| 293            | 0,181               | 0,062               | 9072          |

Таким образом, удельный показатель энергопотребления криоконцентратора составит  
 - для установки оснащенной предварительной ступенью охлаждения  
 $T_{н.ижп} = 278 K: w_{уд} = 90,88 \text{ Дж/л};$   
 - для установки без ступени предварительного охлаждения  
 $T_{н.ижп} = 293 K: w_{уд} = 108,79 \text{ Дж/л}.$

Аналогичным образом для выбранных условий теплообмена произведен расчет удельного показателя энергопотребления для установок, работающих на холодильных агентах R410A и R507. Графически результаты сравнения удельных показателей энергопотребления представлены на рис. 4.



**Рис. 4 – Диаграмма удельного показателя энергопотребления криоконцентратора в зависимости от наличия ступени предварительного охлаждения для хладагентов R404A, R410A и R507**

**Fig. 4 – Diagram of the specific energy consumption of a cryoconcentrators depending on the presence of a pre-cooling stage for refrigerants R404A, R410A and R507**

Представленные результаты позволяют говорить о целесообразности применения ступени без машинного предварительного охлаждения исходного жидкого продукта. Стоит отметить, что тенденция снижения удельного показателя энергопотребления сохраняется при рассмотрении установки, работающей на разных холодильных агентах, что также говорит в пользу применения ступени предварительного охлаждения.

**Вывод.** Разработана методика сравнительной оценки энергетической эффективности холодильной установки на основе анализа производства энтропии в процессе работы установки. Отличие разработанной методики от известных заключается в возможности ее применения для устройств, работающих в условиях ледообразования, в том числе оснащенных ступенью предварительного охлаждения.

Таким образом, разработанная методика позволяет делать выводы об энергетической эффективности различных конструктивных решений для криоконцентраторов, ледогенераторов и холодоаккумуляторов объемного принципа действия. Произведен оценочный расчет, показавший снижение удельного показателя энергопотребления примерно на 16% за счет использования ступени предварительного охлаждения исходного жидкого продукта.

#### Библиографический список:

1. Си Д. Применение технологии криоконцентрирования в процессах очистки воды // Оригинальные исследования. – 2024. – № 4 т. 14. – С. 65-69.
2. Бурдо О.Г., Терзиев С.Г., Мордынский В.П., Сиротюк И.В., Фатеева Я.А. Многофункциональное оборудование для низкотемпературного разделения пищевых растворов на основе эффекта "термического парадокса" // Проблемы региональной энергетики. – 2022. – № 1(53). – С. 42-58.

3. Булгаков, С.В., Садыкова А.В. Деминерализация засоленной оборотной воды нефтепереработки вымораживанием // *Вода: химия и экология*. – 2023. – № 6. – С. 36-40.
4. Plotnikov I.B., Korotkiy I.A., Neverov E.N., Korotkaya E.V., Plotnikova L.V. Modernization of the mechatronic water treatment module for processing plants of the agro-industrial complex // *Eurasian Physical Technical Journal*. –2023. – Vol. 20. – P. 99-110.
5. Патент № 2776583 С1 Российская Федерация, МПК G21F 9/06, B01D 9/04, C02F 1/22. Способ концентрирования неорганических жидких радиоактивных отходов: № 2021132237: заявл. 04.11.2021: опубл. 22.07.2022 / А.М. Скоробогатов.
6. Архаров, А.М. Основы криологии. Энтропийно-статистический анализ низкотемпературных систем. – М.: Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, 2014. 512 с.
7. Zdobnov M.I., Lavrov N.A., Shishov V.V. Entropy Analysis of Energy Losses in Heat-Exchanger and Mixing Sections of a Central Air Conditioner. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2023;58:943-952.
8. Талызин М.С. Методы анализа энергоэффективности холодильных установок // *Холодильная техника*. – 2021. – № 1. – С. 23-30.
9. Архаров А.М., Шишов В.В. Энтропийно-статистический анализ распределения затрат энергии на компенсацию необратимости рабочих процессов систем кондиционирования // *Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия Машиностроение*. – 2013. – № 2(91). – С. 84-97.
10. Осипенко В.В., Лавров Н.А. Анализ потерь в фанкойлах с помощью энтропийно-статистического метода // *Холодильная техника*. – 2022. – № 1. – С. 5-12.
11. Кудров Ю.В. Энтропийно-статистический анализ эффективности циклов холодильных агрегатов бытовых холодильников // *Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки*. – 2022. – № 4. – С. 16-25.
12. Ugolnikova M.A., Chernyavskaya V.V. Dynamics of water ice formation during the operation of vessel cryoconcentrators // *Chemical and Petroleum Engineering*. – 2021. – Vol. 57 (7–8). – P. 561–566.
13. Патент № 2805851 С1 Российская Федерация, МПК B01D 9/04, A23C17/00. Способ криоконцентрирования молочной сыворотки: № 2023105985: заявл. 15.03.2023: оп. 24.10.23/В.А.Ермолаев, Д.Е.Федоров.
14. Патент № 2805848 С1 Российская Федерация, МПК A23L2/02. Способ криоконцентрирования грейпфрутового сока: № 2023105966: заявл. 15.03.2023: опубл. 24.10.2023/В.А. Ермолаев, Д.Е. Федоров.
15. Патент № 2818334 С1 Российская Федерация, МПК A23L 2/02, A23L 2/08. Способ криоконцентрирования вишневого сока: №2023132221: заявл.07.12.2023: опубл.02.05.2024/В.А.Ермолаев, Д.Е.Федоров.
16. Патент № 2803875 С1 Российская Федерация, МПК B01D 9/04. Способ криоконцентрирования плазмы крови убойных животных: № 2023105972: заявл. 15.03.2023: опубл. 21.09.2023/В.А. Ермолаев, Д.Е. Федоров.
17. Патент № 2805850 С1 Российская Федерация, МПК B01D 9/04, A23C 17/00. Способ криоконцентрирования пашты: № 2023105970: заявл. 15.03.2023: опубл. 24.10.2023 / В.А. Ермолаев, Д.Е. Федоров.
18. Ястребов А.Л. Инженерные коммуникации на вечномёрзлых грунтах. –Л.: Стройиздат, 1972 г. 175 с.
19. Угольников М.А. Моделирование процессов теплообмена при наморживании водного льда на неизолированных элементах низкотемпературного оборудования: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва. 2017. – 140 с.
20. Калнинь И.М., Фадеков К.Н. Термодинамические циклы холодильных машин и тепловых насосов: расчет, оценка эффективности: учебное пособие. – М.: МГУИЭ, 2006. 91 с.
21. Талызин, М.С. Разработка методики определения потерь в холодильных установках энтропийно-статистическим методом и ее применение для предприятий пищевой промышленности: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва. 2018. – 141 с.

#### References:

1. Xi D. Application of cryoconcentration technology in water treatment processes. Original research. 2024; 4:65-69. (In Russ)
2. Burdo O.G., Terziev S. G., Mordynskiy V.P., Sirotiyuk I.V., Fateeva Ya.A. Multifunctional Equipment for Low-temperature Separation of Food Solutions Based on The Effect of “Thermal Paradox”. *Problemele energeticii regionale*. 2022; 1:42-58. (In Russ)
3. Bulgakov S.V., Sadykova A.B Demineralization of saline recycled oil refining water by freezing. *Water: chemistry and ecology*. 2023; 6: 36-40. (In Russ)
4. Plotnikov I.B., Korotkiy I.A., Neverov E.N., Korotkaya E.V., Plotnikova L.V. Modernization of the mechatronic water treatment module for processing plants of the agro-industrial complex. *Eurasian Physical Technical Journal*. 2023; 20: 99-110.
5. Patent of the Russian Federation No 2776583 C1, IPC G21F 9/06, B01D 9/04, C02F 1/22. Method for concentrating inorganic liquid radioactive waste: No 2021132237: declared. 04.11.2021: publ. 22.07.2022 / A.M. Skorobogatov. (In Russ)
6. Arkharov A.M. Fundamentals of Cryology. Entropy-Statistical Analysis of Low-Temperature Systems. M.: Bauman Moscow State Technical University. 2014; 512. (In Russ)

7. Zdobnov M.I., Lavrov N.A., Shishov V.V. Entropy Analysis of Energy Losses in Heat-Exchanger and Mixing Sections of a Central Air Conditioner. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2023; 58:943-952.
8. Talyzin M.S. Energy-efficiency analysis methods for refrigeration plants. *Refrigeration Technology*. 2021; 1:23-30. (In Russ)
9. Arkharov A.M., Shishov V.V. Entropic and statistical analysis of energy expenditure distribution to compensate for irreversibility of working processes of air conditioning systems. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Bauman, Mashinost. Spetsvyp.* 2013; 2:84-97. (In Russ)
10. Osipenko V.V, Lavrov N.A. Analysis of losses in fan coil units by using the entropy-statistical method. *Refrigeration Technology*. 2022; 1:5-12. (In Russ)
11. Kudrov Yu.V. Entropy-statistical analysis of the efficiency of cycles of refrigeration units of household refrigerators. *Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences*. 2022; 4: 16-25. (In Russ)
12. Ugolnikova M.A., Chernyavskaya V.V. Dynamics of water ice formation during the operation of vessel cryoconcentrators. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2021; 57:561–566.
13. Patent of the Russian Federation No2805851 C1, IPC B01D 9/04, A23C17/00. Method of cryoconcentration of whey: No 2023105985: declared.15.03.2023: publ.24.10.2023. V.A. Ermolaev, D.E. Fedorov. (In Russ)
14. Patent of the Russian Federation No2805848 C1 IPC A23L 2/02. Method for cryoconcentration of grapefruit juice: No 2023105966: declared. 15.03.2023: publ. 24.10.2023.V.A. Ermolaev, D.E. Fedorov. (In Russ)
15. Patent of the Russian Federation No2818334 C1 IPC A23L 2/02, A23L 2/08. Method of cryoconcentration of cherry juice: No 2023132221: declared. 07.12.2023: publ. 02.05.2024. V.A. Ermolaev, D.E. Fedorov.
16. Patent of the Russian Federation No № 2803875 C1 IPC B01D 9/04. Method for cryoconcentration of blood plasma from slaughtered animals: No 2023105972: declared. 15.03.2023: publ. 21.09.2023. V.A. Ermolaev, D.E. Fedorov. (In Russ)
17. Patent of the Russian Federation No 2805850 C1 IPC B01D 9/04, A23C 17/00. Method of cryoconcentration of buttermilk: No 2023105970: declared. 15.03.2023: publ. 24.10.2023. V.A. Ermolaev, D.E. Fedorov.
18. Iastrebov A.L. Engineering communications on permafrost soils. L.: Stroizdat. 1972; 175. (In Russ)
19. Ugolnikova M.A. Modeling of heat transfer processes during freezing of water ice on uninsulated elements of low-temperature equipment: dissertation for the degree of candidate of technical sciences. Moscow. 2017;140. (In Russ)
20. Kalnin' I.M., Fadegov K.N. Thermodynamic cycles of refrigeration machines and heat pumps: calculation, efficiency assessment: a tutorial. M.: MGUIE. 2006; 91. (In Russ)
21. Talyzin M.S. Development of a methodology for determining losses in refrigeration units using the entropy-statistical method and its application to food industry enterprises: dissertation for the degree of candidate of technical sciences. Moscow. 2018;41. (In Russ)

#### Сведения об авторах:

Чернявская Варвара Васильевна, старший преподаватель кафедры «Техника низких температур им. П.Л. Капицы»; [v\\_ch20@mail.ru](mailto:v_ch20@mail.ru); ORCID:0009-0005-5986-0165.

Сапожников Владимир Борисович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Техника низких температур им. П.Л. Капицы»; [sapojnikov47@mail.ru](mailto:sapojnikov47@mail.ru); ORCID:0009-0002-9252-8437.

Чернявский Александр Васильевич, аспирант кафедры «Техника низких температур им. П.Л. Капицы»; [a\\_ch14@mail.ru](mailto:a_ch14@mail.ru); ORCID: 0009-0000-6964-4101.

Угольникова Мария Андреевна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Техника низких температур им. П.Л. Капицы»; [set-square@mail.ru](mailto:set-square@mail.ru); ORCID:0009-0009-2629-3001.

#### Information about authors:

Varvara V. Chernyavskaya, Senior lecturer, Department «Low Temperature Engineering named after P.L. Kapitsa»; [v\\_ch20@mail.ru](mailto:v_ch20@mail.ru); ORCID:0009-0005-5986-0165.

Vladimir B. Sapozhnikov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Prof., Department «Low Temperature Engineering named after P.L. Kapitsa»; [sapojnikov47@mail.ru](mailto:sapojnikov47@mail.ru); ORCID:0009-0002-9252-8437.

Alexander V. Chernyavsky, Postgraduate Student, Department «Low Temperature Engineering named after P.L. Kapitsa»; [a\\_ch14@mail.ru](mailto:a_ch14@mail.ru); ORCID: 0009-0000-6964-4101.

Mariya A. Ugolnikova, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Department «Low Temperature Engineering named after P.L. Kapitsa»; [set-square@mail.ru](mailto:set-square@mail.ru); ORCID:0009-0009-2629-3001.

#### Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 08.10.2025.

Одобрена после рецензирования/Revised 30.10.2025.

Принята в печать/Accepted for publication 01.11.2025.

## Разработка математической модели для оценки качества внедрения системы телеметрии в организационную структуру управления газодымозащитной службы

А.Т. Алдабеков<sup>1</sup>, В.В. Терехнев<sup>2</sup>, А.С. Зюкова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Академия гражданской защиты имени Малика Габдуллина

Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Казахстан,

<sup>1</sup>020000, г. Кокшетау, ул. Акана-серэ, д. 136, Республика Казахстан,

<sup>2</sup>Академия Государственной противопожарной службы МЧС России,

<sup>2</sup>129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4, Россия

**Резюме. Цель.** Статья посвящена актуальным вопросам совершенствования газодымозащитной службы как в Республике Казахстан, так и за рубежом. Цель исследования состоит в разработке и внедрении инновационных подходов к совершенствованию газодымозащитной службы, направленных на повышение уровня защиты жизни спасателей и пострадавших в чрезвычайных ситуациях. Особое внимание уделяется интеграции современных технологических решений, позволяющих минимизировать риски, связанные с работой в непригодной для дыхания среде. Актуальность темы обусловлена ростом числа техногенных катастроф и необходимостью повышения эффективности действий аварийно-спасательных формирований. **Метод.** Исследование фокусируется на внедрении комплексной системы телеметрии, обеспечивающей удаленный мониторинг физиологического состояния спасателей, параметров окружающей среды и местоположения личного состава. Это позволяет корректировать действия подразделений, распределять ресурсы и оперативно реагировать на изменяющиеся условия. Система включает датчики, средства передачи данных и программное обеспечение для аналитики. **Результат.** Результаты внедрения телеметрии показали значительную оптимизацию управленческих процессов: сокращение количества руководящего персонала, возможность формирования дополнительных мобильных групп и повышение координации действий, что повлияло на оперативность реагирования и снижение времени на проведение поисково-спасательных работ. **Вывод.** Усовершенствованные механизмы мониторинга и управления на основе телеметрии являются ключевыми факторами повышения безопасности и эффективности работы газодымозащитных служб. Полученный опыт может быть успешно адаптирован и применен в других странах.

**Ключевые слова:** система телеметрий, функции управления газодымозащитной службы, модель управления, звено газодымозащитной службы, газодымозащитная служба, контрольно-пропускной пункт, структура управления

**Для цитирования:** А.Т. Алдабеков, В.В. Терехнев, А.С. Зюкова. Разработка математической модели для оценки качества внедрения системы телеметрии в организационную структуру управления газодымозащитной службы. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025;52(4):16-22. DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-4-16-22.

## Development of a mathematical model for assessing the quality of implementation of a telemetry system into the organizational structure of gas and smoke protection service management

A.T. Aldabekov<sup>1</sup>, V.V. Terebnev<sup>2</sup>, A.S. Zyukova<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Malik Gabdullin Civil Defence Academy MES of the Republic of Kazakhstan,

<sup>1</sup>136 Akana-sere Str., Kokshetau 020000, Republic of Kazakhstan,

<sup>2</sup> Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia,

<sup>2</sup>4 Boris Galushkin Str., Moscow 129366, Russia

**Abstract. Objective.** The article is devoted to topical issues and practical aspects of improving the gas and smoke protection service both in the Republic of Kazakhstan and abroad. The main purpose of the research is to develop and implement innovative approaches to improving the gas and smoke protection service, aimed at improving the level of protection for the lives of both rescuers and victims in emergency situations. Special attention is paid to the integration of modern technological solutions that minimize the risks associated with working in an inhospitable environment. The relevance of the topic is due to the growing number of man-made disasters and the need to increase the effectiveness of emergency rescue units. **Method.** The research focuses on the implementation of a comprehensive telemetry system that provides remote monitoring of the physiological state of rescuers, environmental parameters and the location of personnel. This allows you to adjust the actions of departments in real time, allocate resources and quickly respond to changing conditions. The system includes sensors, data transmission facilities, and analytics software. **Result.** As a result of the introduction of telemetry, significant optimization of management processes has been shown.: reducing the number of necessary management personnel, the possibility of forming additional mobile groups and improving overall coordination. This had a direct impact on the responsiveness and reduced time for search and rescue operations. **Conclusion.** The use of improved telemetry-based monitoring and management mechanisms is a key factor in improving the safety and efficiency of gas and smoke protection services, and the experience gained can be successfully adapted and applied in other countries.

**Keywords:** telemetry system, gas and smoke protection service control functions, control model, gas and smoke protection service unit, gas and smoke protection service, checkpoint, control structure

**For citation:** A.T. Aldabekov, V.V. Terebnev, A.S. Zyukova. Development of a mathematical model for assessing the quality of the implementation of a telemetry system into the organizational structure of the gas and smoke protection service. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2025; 52(4):16-22. DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-4-16-22.

**Введение.** Совершенствование системы управления газодымозащитной службы Республики Казахстан может быть достигнуто путем внедрения технических средств и программного обеспечения в практику контроля за работой звена газодымозащитной службы при ликвидации чрезвычайных ситуаций в условиях непригодной для дыхания среде. Для этих целей можно рассмотреть систему, включающую в себя датчики и устройство для передачи информации на персональный компьютер (программно-аппаратная часть). Эта мера позволит снизить количество уровней контроля за работой звена газодымозащитной службы, а также сократит число руководителей между руководителем тушения пожара и газодымозащитником [1]. Если рассматривать телеметрию как измерительную систему, можно предположить, что качество работы системы будет напрямую зависеть от вероятности отказа отдельных компонентов системы, то есть конкретных средств измерения.

**Постановка задачи.** В связи с этим возникают две задачи оценки вероятности отказа. Первая задача - заключается в определении вероятности выхода из строя конкретного измерительного устройства при его использовании в экстремальных условиях пожара (высокие температуры, воздействие средств для тушения и т.д.). Это означает, что оценка будет проводиться в процессе непосредственных действий по тушению пожара, выполняемых группой газодымозащитников. Вторая задача заключается в оценке вероятности сбоя механизмов обработки данных во время работы системы телеметрии. Интенсивность её применения в процессе ликвидации пожаров определяет уровень возможных отказов на момент активации средств индивидуальной защиты дыхательных путей и зрения, таких как дыхательные аппараты, используемые в подразделениях противопожарной службы Республики Казахстан.

**Методы исследования.** Для решения первой задачи необходимо выбрать математическую модель для оценки вероятности отказа системы телеметрии в эксплуатации.

Система телеметрии представляет собой совокупность технических средств измерения (датчиков давления), каналов связи (проводные магистрали, Groupe Spécial Mobile, Global Positioning System и т.д.) и персонального компьютера (включающего в себя как минимум процессор и графический интерфейс). Согласно первой задачи оцениваем вероятность отказа средств обработки данных, то есть персонального компьютера (программно-аппаратная часть). Сбой хотя бы одного из измерительных инструментов в системе мониторинга телеметрии приводит к неисправности всей системы. Это обусловлено тем, что система анализирует продолжительность работы группы, учитывая информацию от всех газодымозащитников, и отсутствие данных от даже одного дыхательного аппарата в этой группе не позволяет адекватно провести расчетный процесс [2-5]. Таким образом, если хотя бы одно измерительное устройство выйдет из строя, это будет означать сбой всей системы. Тем не менее, чтобы уточнить расчет, требуется определить необходимость отключения каждого отдельного элемента системы.

Для анализа вероятностей, применяемых в расчетах, воспользуемся системой уравнений Эрланга, представленную в следующем формате [6-11]

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dP_{i,0}(t)}{dt} = -\lambda P_{i,0}(t) + \mu P_{i,1}(t); \\ \frac{dP_{i,1}(t)}{dt} = -\lambda P_{i,1}(t) - \mu P_{i,1}(t) + \lambda P_{i,0}(t) + \mu P_{i,2}(t); \\ \dots \\ \frac{dP_{i,k}(t)}{dt} = -\lambda P_{i,k}(t) - \mu P_{i,k}(t) + \lambda P_{i,k-1}(t) + \mu P_{i,k+1}(t); \\ \dots \\ \frac{dP_{i,m}(t)}{dt} = -\mu P_{i,m}(t) + \lambda P_{i,m-1}(t); \\ P_{i,0}(t) + \dots + P_{i,m}(t) = 1. \end{array} \right. \quad (1)$$

с начальными условиями  $P_{i,0}(t=0) = 1$ ;  $P_{i,k}(t=0) = 0$ ,  $k_i = 1, 2, \dots, m$ .

В (1) используются обозначения:  $\mu_i = \sum_{k=1}^{m_i} \mu_{ik}$  - интенсивность восстановления

средств измерения, 1/(ед.вр.);  $\lambda_i = \sum_{k=1}^{m_i} \lambda_{ik}$  - интенсивность отказа средств измерения,

1/(ед.вр.);  $i=1, 2, 3, \dots, n$ . Стационарное решение (1), базирующееся на известных теоремах Маркова и записывается следующим образом:

$$P_{i,k} = P_{i,0} (\lambda / \mu)^k; P_0 = 1 - \lambda / \mu; \sum_{k=1}^m P_{i,k} = 1, k_i = 1, 2, \dots, m.$$

**Обсуждение результатов.** Учитывая, что рабочее время звеньев газодымозащитной службы варьируется и колеблется от 15 до 40 минут в зависимости от модели используемых дыхательных приборов, необходимо при разработке решений учитывать эту нестабильность. Таким образом, при решении поставленных задач важно применять подходы, которые учитывают нестационарные условия [12-15].

Исследуем, как будет сформулирована система уравнений Эрланга для заданных проблем. В процессе детального рассмотрения для решения второй задачи уравнения Эрланга может остаться без изменений, поскольку при возникновении отказа обработки данных имеется возможность его восстановления в ходе технического обслуживания.

В ходе решения первой задачи отсутствует интенсивность восстановления, поскольку в условиях воздействия опасных факторов пожара в неправильной для дыхания

среде, в случае сбоя измерительного прибора у газодымозащитников нет возможности провести их починку или техническое обслуживание. В результате этого система уравнений Эрланга будет формулироваться следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dP_{i,0}(t)}{dt} = -\lambda(t)P_{i,0}(t); \\ \frac{dP_{i,1}(t)}{dt} = \lambda(t)P_{i,0}(t) - \lambda(t)P_{i,1}(t); \\ \dots \\ \frac{dP_{i,k}(t)}{dt} = \lambda(t)P_{i,k-1}(t) - \lambda(t)P_{i,k}(t); \\ \dots \\ \frac{dP_{i,m}(t)}{dt} = \lambda(t)P_{i,m-1}(t); \\ P_{i,0}(t) + \dots + P_{i,m}(t) = 1. \end{array} \right. \quad (2)$$

с начальными условиями:  $P_{i,0}(t=0) = 1$ ;  $P_{i,k}(t=0) = 0$ ,  $k=0,1,2,\dots,m$ .

$P_0$  – вероятность состояния системы телеметрии при котором в исправном состоянии находятся все средства измерения;

$P_1$  – вероятность состояния системы телеметрии при котором отказало хотя бы одно средство измерения;

$P_i$  – вероятность состояния системы телеметрии при котором отказало  $i$  средств измерения.

Аналитические решения для системы уравнений (2) известны при фиксированных значениях  $\lambda$  (1/мин). Однако в данном контексте мы рассматриваем применение измерительных приборов в условиях агрессивной среды, из-за чего уровень отказов будет зависеть от времени, в течение которого измерительное устройство находится в непригодной для дыхания среде. Запишем данную зависимость следующим образом:

$$\lambda(t) = a \cdot t + b,$$

где  $a$  и  $b$  константы определяемые опытным путем.

В этом случае, аналитическое решение системы уравнений записывается методом Ньютона (3) и (4).

$$P_{i,k}(t) = \frac{\left( \int_0^t \lambda(t) dt \right)^k}{k!} \exp\left( - \int_0^t \lambda(t) dt \right), \quad k=0,1,2,\dots,m-1; \quad (3)$$

$$P_{i,m}(t) = 1 - \left( \sum_{k=0}^{m-1} \frac{1}{k!} \left( \int_0^t \lambda(t) dt \right)^k \right) \exp\left( - \int_0^t \lambda(t) dt \right), \quad k=0,1,2,\dots,m-1. \quad (4)$$

Используя выведенную математическую модель начинаем решать первую задачу, для этого моделируем следующее, что звено ГДЗС состоит из трех газодымозащитников при этом технические характеристики средств измерения используемых в системе телеметрии определяет следующие значения параметров отказа ( $a=5 \cdot 10^{-4}$  (1/мин<sup>3</sup>)  $b=0,1$  (1/мин)) определить показатели вероятностей отказа средств измерения в системе на моменты времени 20 минут работы и 30 минут работы. Определим значения вероятностей отказа для момента времени 20 минут:

$$\Lambda(20) = \frac{at^2}{2} + bt = \frac{5 \cdot 10^{-4} \cdot 20^2}{2} + 7 \cdot 10^{-3} \cdot 20 = 0,34 \text{ 1/мин}$$

- определим вероятность безотказной работы системы телеметрии

$$P_0(20) = \exp(-(\Lambda(20))) = \exp(-0,34) = 0,712;$$

- определим вероятность отказа одного средства измерения

$$P_1(20) = (\Lambda(20)) \exp(-(\Lambda(20))) = 0,34 \exp(-0,34) = 0,242;$$

- определим вероятность отказа двух средств измерения

$$P_2(20) = \frac{1}{2} (\Lambda(t))^2 \exp(-(\Lambda(t))) = \frac{1}{2} (0,34)^2 \exp(-0,34) = 0,041;$$

- определим вероятность отказа всех средств измерения

$$P_3(20) = 1 - 0,712 - 0,242 - 0,041 = 0,005.$$

Определим значения вероятностей отказа для момента времени 30 минут:

$$\Lambda(30) = \frac{at^2}{2} + bt = \frac{5 \cdot 10^{-4} \cdot 30^2}{2} + 7 \cdot 10^{-3} \cdot 30 = 0,66 \text{ 1/мин}$$

- определим вероятность безотказной работы системы телеметрии

$$P_0(30) = \exp(-(\Lambda(30))) = \exp(-0,66) = 0,517;$$

- определим вероятность отказа одного средства измерения

$$P_1(30) = (\Lambda(30)) \exp(-(\Lambda(30))) = 0,66 \exp(-0,66) = 0,341$$

- определим вероятность отказа двух средств измерения

$$P_2(30) = \frac{1}{2} (\Lambda(30))^2 \exp(-(\Lambda(30))) = \frac{1}{2} (0,66)^2 \exp(-0,66) = 0,113;$$

- определим вероятность отказа всех средств измерения

$$P_3(30) = 1 - 0,517 - 0,341 - 0,113 = 0,029$$

Рассмотренная система уравнений и ее аналитические решения позволяют расчетным методом определять условия использования и технические средства в системе телеметрии при различном количественном составе звена ГДЗС и различной продолжительности работы в непригодной для дыхания среде.

Решение второй задачи оценки качества работы системы телеметрии заключается в определении вероятности отказа средств обработки данных, получаемых от средств измерения. При этом возможны два варианта работы системы телеметрии, когда к одному персональному компьютеру подключено одно звено ГДЗС и два звена.

Рассчитаем параметры безотказной работы по первому варианту: персональных компьютер – одно звено ГДЗС, для чего будем использовать формулу:

$$P_{1,0}(t) = \frac{\alpha}{1 + \alpha} + \frac{1}{1 + \alpha} \exp(-\lambda \alpha \cdot t) = \frac{0,5}{1 + 0,5} + \frac{1}{1 + 0,5} \exp(-0,01 \cdot 0,5 \cdot 30) = 0,91$$

Рассчитаем параметры безотказной работы по второму варианту: персональных компьютер – два звена ГДЗС, будем использовать формулу:

$$P_{2,0}(t) = \frac{\alpha^2}{\gamma} + \frac{1}{2} \cdot \frac{\exp(-\lambda \beta \cdot t)}{\beta} + \frac{1}{2} \cdot \frac{\exp(-\lambda \xi \cdot t)}{\xi} =$$

$$= \frac{0,5^2}{1,75} + \frac{1}{2} \cdot \frac{\exp(-0,01 \cdot 0,79 \cdot 30)}{0,79} + \frac{1}{2} \cdot \frac{\exp(-0,01 \cdot 2,21 \cdot 30)}{2,21} = 0,79$$

где  $\gamma = 1 + \alpha + \alpha^2 = 1 + 0,5 + 0,5^2 = 1,75$ ;

$\beta = 1 + \alpha - \sqrt{\alpha} = 1 + 0,5 - \sqrt{0,5} = 0,79$ ;  $\xi = 1 + \alpha + \sqrt{\alpha} = 1 + 0,5 + \sqrt{0,5} = 2,21$ .

**Вывод.** При работе по второму варианту вероятность безотказной работы ниже на 10%. Это говорит о том, что техническая составляющая программно-аппаратного комплекса системы телеметрии не является определяющей при увеличении количества подключенных к ней звеньев газодымозащитной службы.

Следующей задачей исследования является разработка алгоритмов передачи данных и критерии оценки состояния газодымозащитника для подачи команды на «ВЫХОД из опасной зоны».

#### Библиографический список:

1. Об утверждении Наставления по организации газодымозащитной службы органов государственной противопожарной службы Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Казахстан <https://www.gov.kz/memleket/entities/kps/documents/details/381668?lang=ru&ysclid=mer1f0bzbi190061444>.
2. Брушлинский Н.Н. Математические методы и модели управления в противопожарной службе / Н.Н. Брушлинский, С.В. Соколов. - 2-е изд. Испр. и доп. М.: Академия ГПС МЧС России, 2020. 200 с. <https://morozoffk.ru/library/id4279>
3. <https://studfile.net/preview/6849483>. Средства индивидуальной защиты органов дыхания пожарных (СИЗОД): учебное пособие. 2-е изд.; перераб./В.А. Грачев, С.В. Собурь, И.В. Коршунов и др. М.:Пож. книга, 2012. 190с.

4. [https://rusneb.ru/catalog/000200\\_000018\\_RU\\_NLR\\_BIBL\\_A\\_021959395/?ysclid=mer1sq3mw755673379](https://rusneb.ru/catalog/000200_000018_RU_NLR_BIBL_A_021959395/?ysclid=mer1sq3mw755673379). Терребнев В.В. Газодымозащитная служба Часть 1. учебник - М.: КУРС, 2023. 240 с.
5. Организация газодымозащитной службы учебник для студентов среднего профессионального образования по специальности "20.02.04 Пожарная безопасность" /И.В. Коршунов, В.В. Терребнев, В.А. Грачев, Д.В. Андреев. — Москва: КУРС, ИНФРА-М, 2017, [т.е. 2016]. — 292, [2] с. ил.; 22. — (Среднее профессиональное образование); ISBN 978-5-906818-81-2, 978-5-16-012265-6.
6. Подготовка газодымозащитника : организация и обеспечение газодымозащитной службы: учебное пособие /В.Н. Масаев, В.Л. Марченко, И.В. Думаревский, А.Н. Минкин; Сибирский федеральный университет. – Красноярск: Сибирский федеральный университет (СФУ), 2017. – 212 с.: ил. – Режим доступа: по подписке. – URL: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=497451>
7. Газодымозащитная служба. Основы. Терребнев В.В. Учебник, для высшего образования по направлению подготовки: 2.20.00.00 "Техносферная безопасность и природообустройство" (квалификация "бакалавр"), в двух частях. Ч. 2. - 2023. - 255, ISBN 978-5-907535-69-5.
8. Мусайбеков А.Г. Использование дискриминантного анализа при определении условного признака сложности пожара // Наука и образование в гражданской защите – 2022. - № 3 – С. 49-55. - URL: [https://agz.edu.kz/2022g\\_nayka\\_i\\_obrazovanie\\_v\\_grazhdanskoj\\_zashite\\_3\\_47](https://agz.edu.kz/2022g_nayka_i_obrazovanie_v_grazhdanskoj_zashite_3_47)(дата обращения 10.04.2023).
9. [https://agz.edu.kz/nayka\\_i\\_obrazovanie\\_v\\_grazhdanskoj\\_zashite\\_3\\_42.html](https://agz.edu.kz/nayka_i_obrazovanie_v_grazhdanskoj_zashite_3_42.html) (дата обращения 22.04.2023). Мусайбеков А.Г. Модель и результаты определения ранга пожара на основе дискриминантного анализа//Наука и образование в гражданской защите. -2021. - № 3 - С. 27-32.
10. Захаров И.А. Анализ временных характеристик функционирования пожарно-спасательных подразделений // Наука и образование в гражданской защите – 2021. - № 4 – С. 74-80. - URL: [https://agz.edu.kz/vestnik\\_4\\_44.html](https://agz.edu.kz/vestnik_4_44.html) (дата обращения 02.05.2023).
11. Алдабеков А.Т., Аскараров Р.С. Совершенствование учебно-тренировочного комплекса для подготовки газодымозащитников // Наука и образование в гражданской защите – 2021. - № 4 – С. 94-100. - URL: [https://agz.edu.kz/vestnik\\_4\\_44.html](https://agz.edu.kz/vestnik_4_44.html) (дата обращения 02.05.2023).
12. Алдабеков А.Т. Совершенствование газодымозащитной службы в Академии гражданской защиты имени Малика Габдуллина Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Казахстан.// Актуальные проблемы пожарной безопасности, предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций. Сборник тезисов и докладов XIII-ой Международной научно-практической конференции. 07 октября 2022 г. – Кокшетау: АГЗ им. М. Габдуллина МЧС РК, 2022. – 275 с.
13. Алдабеков, А.Т. Математическое моделирование применения звеньев газодымозащитной службы в Республики Казахстан / А.Т. Алдабеков // Сибирский пожарно-спасательный вестник. – 2024. – № 4(35). – С. 44-49. – DOI 10.34987/Vestnik.sibpsa.2024.45.94.005. – EDN IBXTGM.
14. Dohare, R.K., Mainuddin, Singhal, G. (2023). Wireless Interface-Based Acquisition, Analysis, and Control System Using Master–Slave Approach for Chemical Laser. In: Bindhu, V., Tavares, J.M.R.S., Chen, J.IZ. (eds) Proceedings of Fifth International Conference on Inventive Material Science Applications. Advances in Sustainability Science and Technology. Springer, Singapore. //doi.org/10.1007/978-981-19-4304-1-14
15. Qin, Y., Bai, Y. and Wen, M. (2017) Data Processing of Fault Recorder in Power System. Energy and Power Engineering, 9, 46-52. doi: 10.4236/epe.2017.94B006.

#### References:

1. On approval of the Manual on the organization of gas and smoke protection service of the state fire service bodies of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Kazakhstan <https://www.gov.kz/memleket/entities/kps/documents/details/381668?lang=ru&ysclid=mer1f0bzbi190061444>
2. Brushlinsky N.N. Mathematical methods and management models in the fire service / N.N. Brushlinsky, S.V. Sokolov. - 2nd ed. Corr. And add. Moscow: Academy of the GPS EMERCOM of Russia, 2020. 200 p. <https://morozoffk.ru/library/id4279> (In Russ)
3. <https://studfile.net/preview/6849483>. Personal respiratory protective equipment for firefighters (PPE): study guide.2nd ed.; revised V.A. Grachev, S.V. Sobur, I.V. Korshunov, et al. Moscow: Fire Book, 2012;190(In Russ)
4. [https://rusneb.ru/catalog/000200\\_000018\\_RU\\_NLR\\_BIBL\\_A\\_021959395/?ysclid=mer1sq3mw755673379](https://rusneb.ru/catalog/000200_000018_RU_NLR_BIBL_A_021959395/?ysclid=mer1sq3mw755673379). Terebnev V.V. Gas and Smoke Protection Service Part1. Textbook. Moscow:KURS, 2023;240.
5. Organization of Gas and Smoke Protection Service textbook for students of secondary vocational education in the specialty "20.02.04 Fire Safety" / I.V. Korshunov, V.V. Terebnev, V.A. Grachev, D.V. Andreev. — Moscow: KURS, INFRA-M, 2017, [i.e. 2016]. 292, [2] p. ill.; 22. (Secondary vocational education); ISBN 978-5-906818-81-2, 978-5-16-012265-6. (In Russ)
6. Training of gas and smoke protection personnel: organization and provision of gas and smoke protection service: study guide / V.N. Masaev, V.L. Marchenko, I.V. Dumarevsky, A.N. Minkin; Siberian Federal University. – Krasnoyarsk: Siberian Federal University (SFU), 2017; 212. Access mode: by subscription. – URL: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=497451> (In Russ)
7. Gas and Smoke Protection Service. Basics., Terebnev V.V. Textbook, for higher education in the field of training: 2.20.00.00 "Technosphere Safety and Environmental Management" (qualification "bachelor"), in two parts. Part 2. - 2023. - 255, ISBN 978-5-907535-69-5. (In Russ)

8. Musaibekov A.G. Use of Discriminant Analysis in Determining the Conditional Sign of Fire Complexity // Science and Education in Civil Defense - 2022. - No. 3 - pp. 49-55. - URL: [https://agz.edu.kz/2022g\\_nayka\\_i\\_obrazovanie\\_v\\_grazhdanskoj\\_zashite\\_3\\_47](https://agz.edu.kz/2022g_nayka_i_obrazovanie_v_grazhdanskoj_zashite_3_47) (date of access 10.04.2023).
9. URL: [https://agz.edu.kz/nayka\\_i\\_obrazovanie\\_v\\_grazhdanskoj\\_zashite\\_3\\_42.html](https://agz.edu.kz/nayka_i_obrazovanie_v_grazhdanskoj_zashite_3_42.html) (date of access 22.04.2023). Musaibekov A.G. Model and results of determining the fire rank based on discriminant analysis. *Science and education in civil defense*. 2021;3:27-32.
10. Zakharov I.A. Analysis of temporal characteristics of the functioning of fire and rescue units. *Science and education in civil defense*. 2021;4:74-80. [https://agz.edu.kz/vestnik\\_4\\_44.html](https://agz.edu.kz/vestnik_4_44.html) (date of access 02.05.2023).
11. Aldabekov A.T., Askarov R.S. Improvement of the educational and training complex for training gas and smoke protection personnel // Science and education in civil defense - 2021. - No. 4 - pp. 94-100. - URL: [https://agz.edu.kz/vestnik\\_4\\_44.html](https://agz.edu.kz/vestnik_4_44.html) (date of access 02.05.2023).
12. Aldabekov A.T. Improvement of the gas and smoke protection service at the Malik Gabdullin Civil Defense Academy of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Kazakhstan. Actual problems of fire safety, prevention and elimination of emergency situations. Collection of abstracts and reports of the XIII International scientific and practical conference. October 7, 2022 – Kokshetau: M. Gabdullin State Fire Protection Agency, Ministry of Emergency Situations of the Republic of Kazakhstan, 2022; 275.
13. Aldabekov, A.T. Mathematical modeling of the use of gas and smoke protection service units in the Republic of Kazakhstan. *Siberian Fire and Rescue Bulletin*. 2024;4(35):44-49. DOI 10.34987/Vestnik.sibpsa.2024.45.94.005. – EDN IBXTGM.
14. Dohare, R.K., Mainuddin, Singhal, G. (2023). Wireless Interface-Based Acquisition, Analysis, and Control System Using Master–Slave Approach for Chemical Laser. In: Bindhu, V., Tavares, J.M.R.S., Chen, J.I.Z. (eds) Proceedings of the Fifth International Conference on Inventive Material Science Applications. *Advances in Sustainability Science and Technology*. Springer, Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-19-4304-1-14>
15. Qin, Y., Bai, Y. and Wen, M. Data Processing of Fault Recorder in Power System. *Energy and Power Engineering*. 2017; 9:46-52. doi: 10.4236/epe.2017.94B006.

**Сведения об авторах:**

Алдабеков Аслан Такенович, доцент кафедры пожарно-спасательной и физической подготовки; mail:tushila\_010@mail.ru

Теребнев Владимир Васильевич, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры пожарно-спасательной и газодымозащитной подготовки; terebnev\_v@mail.ru

Зюкова Анна Станиславовна, кандидат педагогических наук, доцент кафедры иностранных и русского языков; zyuкова.anna@mail.ru

**Information about the authors:**

Aslan T.Aldabekov, Assoc. Prof., Department of Fire and Rescue and Physical Training; tushila\_010@mail.ru

Vladimir V. Terebnev, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Prof., Department of Fire and Rescue and Smoke Protection Training; terebnev\_v@mail.ru

Anna S. Zyukova, Cand. Sci. (Pedag.), Assoc. Prof., Department of Foreign and Russian Languages; zyuкова.anna@mail.ru

**Конфликт интересов/Conflict of interest.**

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

**Поступила в редакцию/Received 03.09.2025.**

**Одобрена после рецензирования/Revised 30.09.2025.**

**Принята в печать/Accepted for publication 01.10.2025.**

**Интеграция и адаптация открытых средств мониторинга для обнаружения аномальной пользовательской активности в Astra Linux Special Edition**  
**И.И. Андреев<sup>1</sup>, С.О. Иванов<sup>1</sup>, Т.Н. Копышева<sup>1</sup>, М.В. Никандров<sup>2</sup>, Т.Н. Смирнова<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова,

<sup>1</sup>428015, г. Чебоксары, Московский пр-т, д. 15, Россия,

<sup>2</sup>ООО «Интеллектуальные сети»,

<sup>2</sup>428003, г. Чебоксары, ул. Пристанционная, д. 1, корп. 9, Россия

**Резюме. Цель.** Разработка и оценка метода интеграции open-source средств мониторинга для обнаружения аномальной активности в Astra Linux Special Edition с учетом встроенных механизмов защиты. **Метод.** Исследование основано на интеграции инструментов Wazuh, OSSEC, Suricata и audit.d; адаптации правил под специфику Astra Linux; тестировании на основе техник MITRE ATT&CK; анализе по стандартам ГОСТ Р 59548-2022 и NIST SP 800-92. **Результат.** Разработана методика интеграции и адаптации open-source средств мониторинга (Wazuh, Suricata, OSSEC) для обнаружения аномальной пользовательской активности в операционной системе специального назначения Astra Linux Special Edition. Осуществлена адаптация правил корреляции событий под встроенные механизмы защиты ОС (мандатный контроль, аудит Parsec) и интеграция с внешними платформами анализа угроз (VirusTotal, URLhaus). **Вывод.** Предложенная методика обеспечивает эффективное обнаружение аномальной активности в Astra Linux. Адаптация Open-Source решений позволила достичь соответствия требованиям безопасности. Система демонстрирует высокую точность при минимальном количестве ложных срабатываний. Рекомендуется для организаций, переходящих на отечественные операционные системы специального назначения.

**Ключевые слова:** кибератака; активность пользователя; мониторинг активности; системы мониторинга; Astra Linux Special Edition

**Для цитирования:** И.И. Андреев, С.О. Иванов, Т.Н. Копышева, М.В. Никандров, Т.Н. Смирнова. Интеграция и адаптация открытых средств мониторинга для обнаружения аномальной пользовательской активности в Astra Linux Special Edition. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025;52(4):23-38. DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-4-23-38.

**Integration and Adaptation of Open-Source Monitoring Tools for Detecting Anomalous User Activity in Astra Linux Special Edition**

**I.I. Andreev<sup>1</sup>, S.O. Ivanov<sup>1</sup>, T.N. Kopysheva<sup>1</sup>, M.V. Nikandrov<sup>2</sup>, T.N. Smirnova<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>I.N. Ulyanov Chuvash State University,

<sup>1</sup>15 Moskovsky Ave, Cheboksary 428015, Russia,

<sup>2</sup>LLC "Intellectual networks",

<sup>2</sup>1 Prstantsionnaya Str., 1, bldg. Cheboksary 428003, Russia

**Abstract. Objective.** Development and evaluation of a method for integrating open-source monitoring tools for detecting abnormal activity in Astra Linux Special Edition, taking into account the built-in protection mechanisms. **Method.** Integration of Wazuh, OSSEC, Suricata and audit tools.d; adaptation of the rules to the specifics of Astra Linux; testing based on MITRE ATT&CK techniques; analysis according to GOST R 59548-2022 and NIST SP 800-92 standards. **Result.** A methodology for integrating and adapting open-source monitoring tools (Wazuh, Suricata, OSSEC) to detect abnormal user activity in the special-purpose operating system Astra Linux Special Edition. Adaptation of event correlation rules to the built-in OS protection mechanisms

(mandatory control, Parsec audit) and integration with external threat analysis platforms (VirusTotal, URLhaus). **Conclusion.** This methodology ensures effective detection of abnormal activity in Astra Linux. Adaptation of open-source software enabled compliance with security requirements. The system demonstrates high accuracy with minimal false positives. It is recommended for organizations migrating to domestic special-purpose operating systems.

**Keywords:** cyberattack; user activity; activity monitoring; monitoring systems; Astra Linux Special Edition

**For citation:** I.I. Andreev, S.O. Ivanov, T.N. Kopysheva, M.V. Nikandrov, T.N. Smirnova. Development of a mathematical model for assessing the quality of the implementation of a telemetry system into the organizational structure of the gas and smoke protection service. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2025; 52(4):23-38. (In Russ) DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-4-23-38.

**Введение.** Увеличение количества кибератак повышает риски утечки информации и компрометации автоматизированных рабочих мест в организациях и на предприятиях [1-3]. Поэтому мониторинг безопасности информации играет ключевую роль в своевременном обнаружении любой подозрительной активности в информационных системах. Подозрительная активность может быть признаком компьютерного инцидента, а один или несколько компьютерных инцидентов – кибератаки на защищаемую систему [4]. С учетом того, что большое количество кибератак происходит по причине ошибок, допущенных пользователями, возникает острая необходимость в непрерывном мониторинге необычной или отклоняющейся от нормы пользовательской активности [5-7].

Своевременное обнаружение компьютерных инцидентов позволяет реагировать на них гораздо быстрее, чем может быть осуществлена атака, что существенно повышает шансы на предотвращение кибератаки и минимизацию возможного ущерба от нее.

Мониторинг действий пользователей имеет важное значение для своевременного реагирования на инциденты информационной безопасности, предотвращения утечки конфиденциальной информации и негативных действий в информационной системе [8-10]. Его можно реализовать с помощью систем обнаружения вторжения – узловых и сетевых [11-13]. Такие меры позволяют увеличить количество информации для анализа событий безопасности и снизить вероятность обнаружения ложно-положительного компьютерного инцидента в информационной системе [14, 15].

Учитывая тот факт, что государственные информационные системы (ГИС) и объекты критической информационной инфраструктуры (ОКИИ) [21] переходят на отечественные операционные системы согласно указам Президента № 166 [21] и № 250 [23], появляется необходимость разработки методов мониторинга нестандартной пользовательской активности в отечественной операционной системе специального назначения (ОССН). В качестве объекта исследования выбрана ОССН Astra Linux Special Edition. Актуальность объясняется следующими факторами:

- Уникальность направления. ОССН Astra Linux Special Edition [16] имеет встроенные средства защиты информации, каждое из которых работает независимо от других и подход к сбору событий от каждого из средств защиты информации уникален;
- Все больше предприятий, государственных органов и учреждений, а также компаний переходят на отечественные ОССН, например, Astra Linux Special Edition [17, 18].

В связи с этим возникает проблема – отсутствие специализированных инструментов для мониторинга ОССН. Данная проблема не решена, поскольку в условиях нестандартных конфигураций безопасности, которые предоставляет отечественная ОС специального назначения, использование открытых решений Wazuh и Open Search демонстрирует большое количество ложно-положительных событий безопасности.

Поэтому появляется необходимость в глубокой адаптации стандартных правил корреляции, обнаружения и анализа событий под ОССН.

**Постановка задачи.** Для обнаружения нестандартной активности пользователей в ОССН необходимо комбинирование нескольких методов мониторинга.

- Подход с открытым исходным кодом. Использование систем мониторинга с открытым исходным кодом не только снижает затраты, но и обеспечивает масштабируемость и гибкость, следовательно, надежность.

- Профилактическая защита. Мониторинг необычной активности пользователей может помочь вовремя выявить потенциальные угрозы безопасности, утечки данных или попытки несанкционированного доступа [19, 20]. Такой подход имеет решающее значение для поддержания целостности и безопасности операционной системы и данных, которые она обрабатывает.

Цель работы: разработка и экспериментальная оценка метода интеграции и адаптации Open Source средств мониторинга для эффективного обнаружения аномальной пользовательской активности в операционной системе специального назначения Astra Linux Special Edition. Для достижения поставленной цели сформулированы следующие задачи:

1. Разработка архитектуры интегрированной системы мониторинга на базе open-source решений (Wazuh, Open Search) для сбора и корреляции событий безопасности в среде ОССН.

2. Адаптация и модификация стандартных правил корреляции, обнаружения и анализа событий (для audit.d, OSSEC, Suricata) под специфику встроенных механизмов защиты Astra Linux Special Edition (мандатный контроль, аудит Parsec) и интеграция с платформами анализа угроз (VirusTotal, URLhaus).

3. Экспериментальная оценка эффективности адаптированного решения по ключевым метрикам (процент обнаружения атак по MITRE ATT&CK, уровень ложных срабатываний, производительность) и анализ его соответствия требованиям стандартов (ГОСТ Р 59548-2022, NIST SP 800-92).

4. Методологическое обоснование подхода к адаптации open-source инструментов мониторинга под уникальные требования ОССН и формулирование практических рекомендаций.

**Методы исследования. Методы мониторинга безопасности.** Выбор методов мониторинга осуществлялся на основе следующих критериев, соответствующих требованиям ГОСТ Р 59548-2022[24] и NIST SP 800-92 [25]:

1. Полнота данных – инструмент должен собирать максимально полный набор событий.

2. Гибкость настройки – инструмент должен иметь возможность адаптировать правила корреляции и парсинга под особые механизмы ОССН (мандатный контроль и встроенные СЗИ).

3. Производительность – инструмент должен оказывать минимальное влияние на скорость и ресурсы ОС при сборе/обработке логов.

4. Поддержка стандартов – инструмент должен иметь совместимость с форматными спецификациями.

5. Масштабируемость – инструмент должен расти вместе с инфраструктурой.

Получать события безопасности системы можно как со встроенных средств, так и с помощью специального программного обеспечения, доступного в репозиториях операционной системы. Также можно использовать открытое программное обеспечение.

В результате проведения тестирования была составлена сравнительная характеристика вышеперечисленных способов (табл. 1).

В процессе сравнения было выявлено, что для формирования подробного журнала событий наилучшим образом подходит встроенное средство аудита – audit.d, хостовая система обнаружения вторжений ossec и сетевая система обнаружения вторжений suricata.

**Таблица 1. Сравнительный анализ способов получения событий системы из Astra Linux Special Edition**

**Table 1. Comparative analysis of ways to get system events from Astra Linux Special Edition**

| Способ Method   | Описание Description  | Технические данные Technical data   | Особенность Feature  |
|---|---|---|--|
| С помощью встроенных средств<br>Using built-in tools  | С помощью файлов директории /var/log, а именно с помощью встроенных файлов журналов операционной системы Linux. | Журналы системы: auth.log или secure, secure.log, message.log или syslog.log, kern.log, cron.log, dpkg.log.                 | В данных журналах содержатся системные события   |
|   | С помощью утилиты syslog-ng, а именно получать события от другого узла, либо отправлять события на другой узел. | Осуществляется настройка конфигурационного файла syslog-ng.conf.  | Можно получить данные от нескольких узлов и собрать их на одном узле, что значительно упрощает их анализ.  |
|   | С помощью циклического вызова команд Linux с определенной задержкой и записью вывода в файл.                    | Вызов следующих утилит: du, vmstat, w, htop, md5sum, audit.d, diff, users, last, lastlog, wtmp.                             | Можно получить данные, которых нет в журналах системы. Данные позволяют получать состояние использования ресурсов Linux.   |
| С помощью программного обеспечения, доступного в репозиториях<br>Using software available in repositories | С помощью утилиты аудита действий в операционной системе – audit.d.   | Осуществляется наблюдение за директорией /etc/audit и файлов audit.log.   | Позволяет отслеживать любые действия в системе, есть возможность настройки своих правил обнаружения.   |
|   | С помощью утилиты – межсетевое экранирование iptables.  | Осуществляется наблюдение за журналом iptables.log.   | Можно получить события о потенциальных атаках на узел, либо нелегитимное разрешение сетевых соединений.  |
|   | С помощью утилиты – межсетевое экранирование nftables   | Осуществляется наблюдение за журналами nf_log, kern.log и syslog.   | Позволяет получить более подробную информацию о сетевой активности, поддерживает механизмы IPv6, VLAN, MPLS и QoS.   |
| С помощью открытого программного обеспечения<br>Using open-source software                                | С помощью инструмента для сбора, парсинга и анализа логов – Logstash.   | Осуществляется настройка конфигурационного файла logstash.yml. Так же конфигурацию можно задавать сразу в командной строке. | Может обрабатывать различные типы данных, логи и метрики, для быстрого и удобного парсинга есть GROK фильтры.  |
|   | С помощью сетевой системы обнаружения вторжений Suricata.   | Осуществляется наблюдение за файлами /etc/suricata/rules/suricata.yml<br>eve.json   | Позволяет отслеживать нелегитимные действия в контролируемой сети.   |
|   | С помощью узловой системы обнаружения вторжений Ossec.  | Осуществляется настройка конфигурационного файла ossec.conf и наблюдение за журналом ossec.log.                             | Позволяет отслеживать действия в системе, есть возможность настройки своих правил обнаружения. В конфигурационный файл можно включить все вышеперечисленные способы. |

На основе этих критериев были выбраны следующие инструменты:

1. audit.d - встроенное средство аудита Astra Linux Special Edition, которое обеспечивает полноту данных, гибкость настройки и минимальное влияние на производительность системы.

2. OSSEC - хостовая система обнаружения вторжений, которая предоставляет расширенные возможности анализа логов и обнаружения аномалий и интеграцию с audit.d для повышения детализации данных.

3. Suricata - сетевая система обнаружения вторжений, которая обладает высокой производительностью при анализе сетевого трафика и возможностью интеграции с OSSEC для комплексного мониторинга.

Комбинация audit.d, OSSEC и Suricata позволяет сформировать журнал событий, в котором отображены действия в системе на уровне хоста и сетевой активности, что делает выбранные инструменты оптимальным решением для мониторинга безопасности в операционной системе специального назначения.

Таким образом, для мониторинга нестандартной пользовательской активности подходят вышеописанные инструменты. Данные инструменты наиболее эффективно применять с системой мониторинга. Для анализа существующих открытых систем мониторинга Wazuh и Open Search составим таблицу анализа сведений о них (табл. 2).

**Таблица 2. Таблица сравнений Wazuh OpenSearch**  
**Table 2. Wazuh Open Search Comparison Table**

| Название Name | Плюсы Pros   | Минусы Cons   |
|---------------|--|---|
| Wazuh         | Бесплатный SIEM и XDR с открытым исходным кодом.<br>Множество готовых правил корреляции.<br>Аудит конечных точек, отображение уязвимостей и оценка безопасности.<br>Контроль целостности файлов и отслеживание изменений.<br>Модуль MITRE ATT&CK для классификаций событий по тактикам и техникам.<br>Агенты для отправки событий и аудита, а также для работы в режиме XDR.<br>Взаимодействие с различными источниками информации, таких как IPS\IDS и межсетевые экраны.<br>Индексатор на базе OpenSearch для записи данных в индексы.<br>Возможность загружать и использовать все плагины OpenSearch. | Необходимость самостоятельной настройки и написания правил корреляции.<br>Отсутствие быстрых обновлений правил детектирования угроз, необходимо обновлять каждый узел отдельно. |
| OpenSearch    | Полностью основан на ELK, имеет открытый исходный код и легко масштабируется.<br>Включает движок хранения и поиска, веб-интерфейс, среду визуализации данных и плагины.<br>Каждый плагин способен работать отдельно от системы и их интегрировать с другими системами.<br>Применяется для управления логами, сбора, систематизации и поиска данных.  | Некоторые возможности, такие как машинное обучение и поддержка SQL, доступны только через плагины.  |

Выбор пал именно на них, так как они являются полностью открытыми системами, что позволяет проводить гибкую и быструю настройку, а также интеграцию с системами аудита и обнаружения вторжений. В качестве системы мониторинга был выбран Wazuh. Выбор Wazuh был осуществлен по следующим причинам:

1. Масштабируемость и гибкость. Открытая платформа для управления безопасностью и мониторинга событий, которая поддерживает интеграцию с множеством источников данных, включая журналы событий ОС, сетевые данные и другие специализированные решения. Удобство для мониторинга нестандартной активности в сложных инфраструктурах, где используются разные компоненты.

2. Интеграция с другими инструментами. Wazuh интегрируется с системами OSSEC, Suricata и Auditd, что позволяет централизовать сбор и анализ данных из разных источников. Например, OSSEC может собирать события с узлов, а затем передавать их в Wazuh для дальнейшего анализа и корреляции.

3. Поддержка правил и сигнатур. Включает обширную библиотеку predefined-правил и возможностей создания собственных сигнатур для обнаружения аномалий. Это важно при мониторинге нестандартных действий, так как позволяет адаптироваться к специфическим сценариям использования.

4. Открытый исходный код. Использование инструментов с открытым исходным кодом снижает затраты и повышает прозрачность процессов обработки данных. Wazuh предоставляет возможность кастомизации и доработки под конкретные нужды организации без необходимости приобретения дорогостоящих лицензий.

5. Превентивные меры и оповещения. Способен автоматически реагировать на обнаружение подозрительных активностей, отправляя уведомления администраторам или инициируя защитные механизмы. Это позволяет оперативно реагировать на потенциальные угрозы до того, как они приведут к серьезным последствиям.

Таким образом, выбор Wazuh обусловлен его функциональностью, совместимостью с другими популярными инструментами безопасности и возможностью адаптации под уникальные требования системы мониторинга.

Условия, в которых проходила проверка работоспособности системы:

- мониторинг за работой системы в Wazuh;
- использование доступных инструментов в Wazuh;
- использование интеграции и скриптов Wazuh для получения эффективного результата в выявлении нестандартной активности пользователей;
- имитация действий пользователя для генерирования событий;
- применение доступных для пользователя инструментов и команд Linux;
- использование средств защиты информации в ОСН (мандатное управление доступом, мандатный контроль целостности, аудит parsec).

Для разработки правил audit.d и suricata был проведен анализ техник MITRE ATT&CK[26] с целью выявления возможного их применения в Astra Linux. Для работы сетевой системы обнаружения вторжения suricata были загружены правила с web-ресурса <https://rules.emergingthreats.net/open/>, проанализированы и адаптированы для анализа сетевой активности в Astra Linux Special Edition.

В качестве основы для правил audit.d (табл. 3), suricata (табл. 4) и ossec (табл. 5) использовались примеры из официальной документации. Каждый пример был тщательно проанализирован, и на его основе разрабатывались необходимые правила для мониторинга определенных действий пользователя в ОСН с учетом встроенных средств защиты информации. Каждое правило создавалось в соответствии с определенной техникой MITRE ATT&CK.

В табл. 3-5. представлены адаптированные правила.

**Таблица 3. Audit.d-правила для отслеживания техник MITRE ATT&CK**

**Table 3. Audit.d-Rules for tracking MITRE ATT&CK Techniques**

| MITRE ID  | Описание действия<br>Description of action     | Правило audit.d<br>Rule   |
|-----------|--|---|
| T1078.003 | Создание/модификация локальных учётных записей | -w /usr/sbin/useradd -p x -k T1078_003<br>-w /usr/sbin/usermod -p x -k T1078_003<br>-w /usr/sbin/adduser -p x -k T1078_003  |
| T1059.004 | Выполнение shell-команд (bash, sh, sudo)       | -a exit,always -F arch=b64 -S bash -k T1059.004<br>-a always,exit -F path=/usr/bin/sudo -F perm=x -F auid>=500 -k T1059.004 |
| T1059.006 | Запуск Python                                  | -w /usr/bin/python -p x -k T1059.006<br>-w /usr/bin/python3 -p x -k T1059.006   |
| T1053.003 | Действия с crontab                             | -w /etc/crontab -p wa -k T1053.003<br>-a always,exit -F path=/usr/bin/crontab -F perm=x -k T1053.003                        |
| T1569     | Управление сервисами                           | -w /usr/bin/systemctl -p x -k T1569<br>-w /usr/bin/systemd -p x -k T1569  |

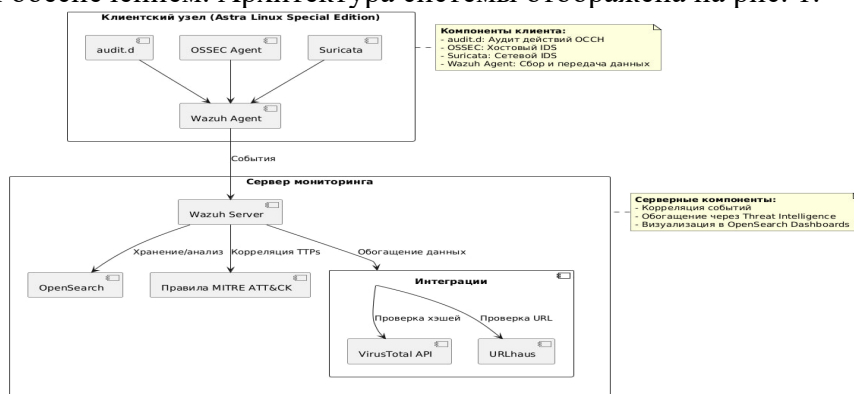
**Таблица 4. Suricata-правила для обнаружения техник MITRE ATT&CK**  
**Table 4. Suricata-Rules for detecting MITRE ATT&CK Techniques**

| MITRE ID  | Описание действия<br>Description of action | Фрагмент правила<br>Fragment of the rule  |
|-----------|--|---|
| T1133     | SSH-соединение на порт 22                  | alert ssh \$EXTERNAL_NET any -> \$HOME_NET 22 (msg:"Connect tp SSH"; ssh.software; content:"openssh"; sid:1000010;)                     |
| T1021.004 | SSH-аутентификация                         | alert tcp \$HOME_NET any -> any 22 (msg:"LOCAL SSH connect"; flow:established,to_server; app-layer-protocol:ssh; sid:1000008; rev:1;)   |
| T1020     | Эксплуатация по SSH                        | alert tcp any any -> any 22 (msg:"Potential SSH exfiltration"; flow:established,to_server; app-layer-protocol:ssh; sid:1000011; rev:1;) |

**Таблица 5. Краткое описание разделов Wazuh Manager (ossec.conf)**  
**Table 5. Brief description of the Wazuh Manager sections (ossec.conf)**

| Группа ID | Описание действия<br>Description   | Правила и условия<br>Terms and Conditions  |
|-----------|------------------------------------|--|
| audit     | Мониторинг выполнения команд       | 1 (Level 3): Audit: Command executed<br>2 (Level 12 → Parent:1): Audit: Suspicious command                                   |
| perf      | Контроль метрик системы            | 10 (Level 3): Metrics check<br>11 (Level 12 → Parent:10): cpu_usage_% >80%<br>12 (Level 12 → Parent:10): memory_usage_% >80% |
| malware   | Обнаружение вредоносной активности | 20 (Level 10): URL-угроза: url_threat=malware_download<br>21 (Level 15 → Parent:20): Malware activity detected               |

**Обсуждение результатов.** Система мониторинга пользовательской активности строится на основе руководства по мониторингу и анализу событий безопасности NIST SP 800-92 и приказа ФСБ №281. Однако были предложены решения для адаптации этих этапов к специфике операционной системы специального назначения и интеграции их с открытым программным обеспечением. Архитектура системы отображена на рис. 1.



**Рис. 1 – Архитектура системы**  
**Fig. 1 – System architecture**

Рассмотрим основные этапы обработки событий и способы реализации каждого компонента с помощью открытого программного обеспечения. Эти этапы описаны в NIST SP 800-92 [25] и в приказе ФСБ №281[27]. Этапы обработки событий:

- Сбор событий. Можно реализовать двумя способами: с агентом либо без агента (собирать данные через syslog-ng). Был реализован сбор событий с агентом.
- Нормализация событий – приведение необработанных событий в единый и читаемый формат. Реализуется с помощью декодеров и правил OSSEC.
- Агрегация событий. Реализуется с помощью Dashboards в Wazuh.
- Обогащение событий новыми данными для более точного анализа предупреждений системы мониторинга (обогащение сетевых событий, данных о хешах скачанных файлов и т.д.).
- Корреляция событий – анализ потока нормализованных событий и выделение из всего потока цепочки событий, которая свидетельствует о потенциальном

инциденте компьютерной безопасности. Применяются плагины корреляции OpenSearch, которые были интегрированы в Wazuh.

Метод анализа нестандартных действий пользователей в ОССН работает следующим образом:

1. Пользователь совершает действие в системе.
2. Создаются события в журналах системы.
3. Событие проходит вышеперечисленные этапы обработки событий.
4. Аналитик оценивает предупреждение в Wazuh.
5. В случае обнаружения подозрительной активности узел изолируется от сети.
6. Аналитик подключается к узлу и применяет меры по реагированию.
7. После устранения угрозы формируется новый пак правил на каждый узел.
8. После разработки пака правил он тестируется с помощью тестовых событий и цепочки атак.

Основные настройки конфигурационных файлов были взяты с официальных сайтов инструментов, проанализированы и адаптированы под ОССН. Для проверки работоспособности системы были смоделированы тестовые события для отдельных компонентов и цепочка атак, согласно MITRE ATT&CK, выполняемую из контролируемого узла для имитации нестандартной активности пользователя. Для тестирования работоспособности системы в целом была составлена цепочка атак из нескольких тактик и техник MITRE ATT&CK. Атака направлена на тестирование правил и системы мониторинга с целью выявления нестандартной активности пользователя, которая может указать на компрометацию учетных данных администратора или захват узла. Этапы атаки представлены ниже в таблице (табл. 6).

**Таблица 6. Этапы атаки**  
**Table 6. Stages of the attack**

| Техника<br>Technique | Описание действия<br>Description of action  | ИОС  | Критичность<br>Criticality |
|----------------------|---|--|----------------------------|
| T1078.003            | Вход в учётную запись пользователя с перехваченными данными                               | Новая запись в audit.log   | Низкая<br>Low              |
| T1059.004            | Использование Unix-shell для получения информации об узле                                 | Вызов нетипичных команд: ip a, cat /etc/hosts, groups, systemctl status  | Низкая<br>Low              |
| T1078.003            | Вход в браузер под чужой учёткой и скачивание эксплойта                                   | Обращение к подозрительным ссылкам   | Средняя<br>Medium          |
| T1068                | Эксплуатация уязвимости CVE-2024-1086 для получения прав root                             | Запуск скрипта с SHA256 d8dd09b01eb4e363d88ff53c0aace04c39d8ea822b7adba7a883970abbf72a77, POC CVE-2024-1086  | Высокая<br>High            |
| T1548.001            | Закрепление в системе: правка sudoers, отключение пароля и создание нового админ-аккаунта | События useradd, правка sudoers, изменение /etc/shadow, запуск nano от системы и sudo от админа  | Высокая<br>High            |
| T1070.003            | Очистка истории команд терминала  | Изменение хеша файла .bash_history   | Низкая<br>Low              |
| T1003.008            | Дамп учётных данных системы   | Несанкционированное чтение /etc/passwd и /etc/shadow, первый sudo + чтение /etc/shadow   | Высокая<br>High            |
| T1083                | Перечисление файлов в директориях   | Обращение к контролируемым каталогам неизвестным пользователем   | Средняя<br>Medium          |
| T1595.001            | Сканирование портов в подсети скриптом на Bash  | Создание и запуск скрипта для сканирования <pre>#!/bin/bash for (i=1;i&lt;255;i++) do echo &gt; /dev/tcp/10.0.2.\$i/24 &amp;&amp; echo "Port is open" done</pre> | Высокая<br>High            |
| T1005                | Сбор информации путем копирования файлов в один каталог                                   | Копирование множества файлов в одну папку  | Средняя<br>Medium          |
| T1020                | Эксплуатация данных по SSH  | SSH-соединение к неизвестному узлу и передача файла  | Высокая<br>High            |
| T1485                | Удаление важных данных с узла   | Удаление контролируемых файлов   | Высокая<br>High            |

В ходе тестирования работоспособности Suricata было зафиксировано нелегитимное сетевое обращение, выполнена загрузка вредоносного программного обеспечения с ресурса

https[:]//pastebin[.]com/raw/ZkwP7zPF (рис. 2). URLhaus: пометка {"found": 1} означает, что URL признан вредоносным. Правило Suricata 86601: «ET POLICY curl User-Agent Outbound» — срабатывает, когда видит исходящий HTTP-запрос с заголовком User-Agent = curl. Отчёт: https://urlhaus.abuse.ch/url/2045738/ показывает тип вредоносного ПО, когда и кем URL добавлен.

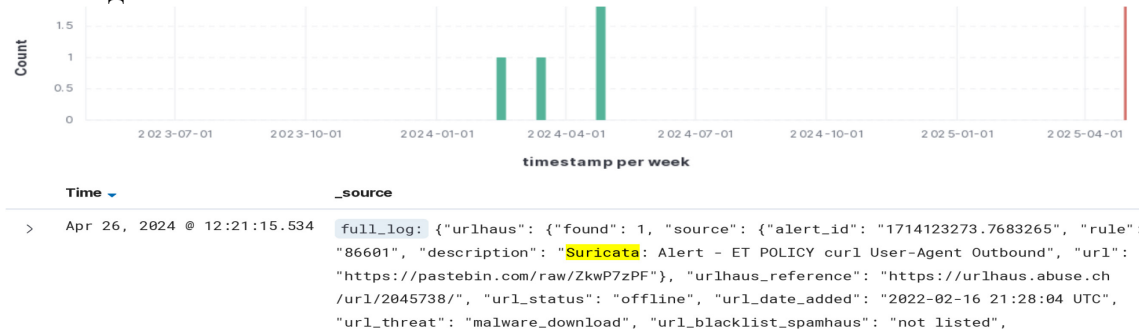


Рис. 2 – Тестирование сетевой системы обнаружения Suricata

Fig. 2 – Testing the Suricata Network detection system

В ходе тестирования работоспособности audit.d в системе было зафиксировано потенциально нелегитимное действие – передача файла с помощью scp (рис. 3). Запись фиксирует успешный запуск команды /usr/bin/scp от пользователя root, инициированный пользователем с auid=1000. Поскольку это соединение могло передавать файлы за пределы сервера, такая активность при отсутствии явной необходимости выглядит подозрительно и поэтому требует проверки.

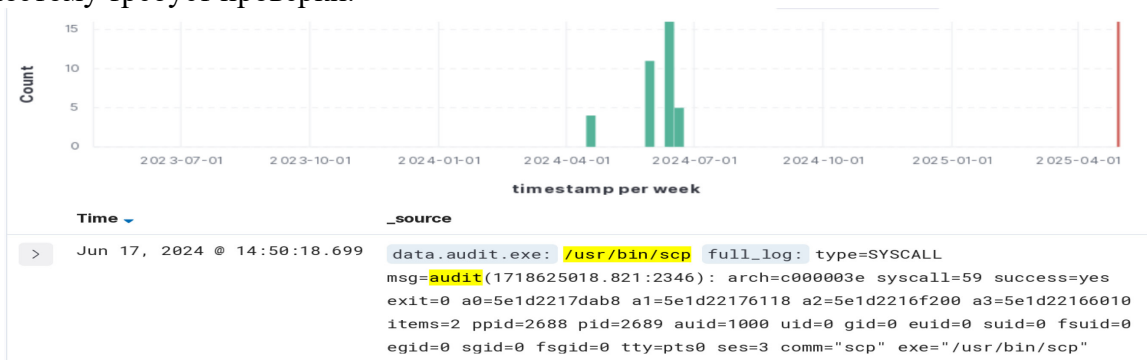


Рис. 3 – Тестирование аудита системы audit.d

Fig. 3 – Testing the audit of the audit.d system

С целью тестирования работоспособности правил OSSEC была выполнена проверка изменений файлов посредством модуля syscheck (рис. 4). Уведомление Wazuh о том, что файл был изменён: его размер вырос с 26625 до 26660 байт, изменился MD5-хеш, время модификации и содержимое, добавлена строка fly-wm [21:55:56] I: Locker finish.

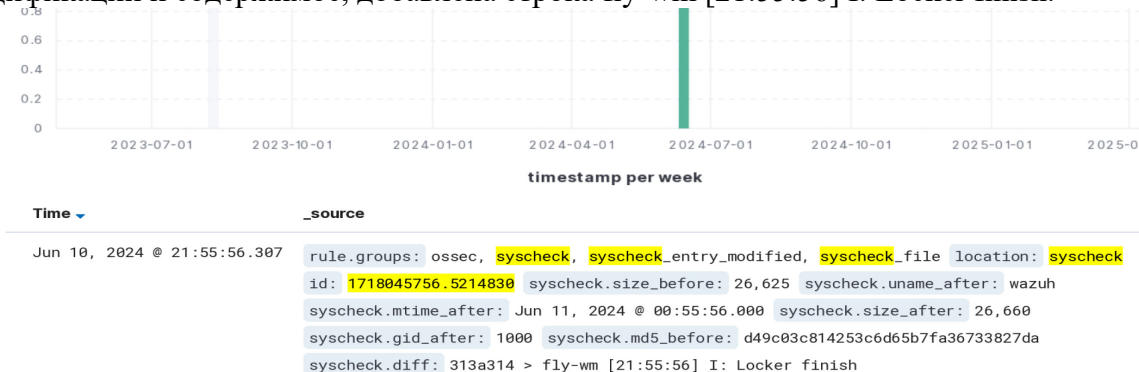


Рис. 4 – Тестирование узловой системы обнаружения вторжения OSSEC

Fig. 4 – Testing of the OSSEC Node Intrusion detection system

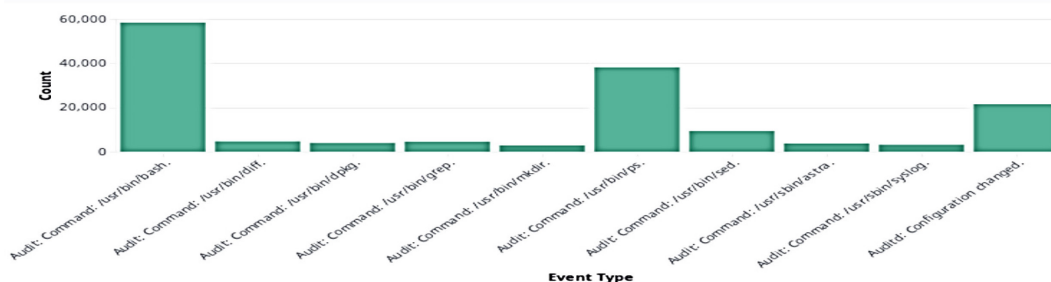
В ходе проведения исследований было сгенерировано общее количество событий: 586705 (сумма всех doc\_count из JSON) (табл. 7). События аудита (audit, audit\_command)

составляют 64.3% от общего числа, что указывает на активное использование механизмов контроля доступа и выполнения команд. Это главная область для мониторинга потенциальных угроз. Изменения в файловой системе (syscheck, syscheck\_file, syscheck\_entry\_modified) занимают 99%. Все данные получены с Wazuh с помощью Dev Tools и HTTP запросов к серверу.

**Таблица 7. События безопасности после тестирования**  
**Table 7. Security events after testing**

| Категория Category                           | Тип события Event Type  | Количество Quantity | Доля (%) Share |
|--|-------------------------|---------------------|----------------|
| Аудит системы<br>System audit                | audit                   | 200,691             | 34.2114%       |
|  | audit command           | 176,532             | 30.0936%       |
|  | audit configuration     | 21,470              | 3.6604%        |
|  | audit selinux           | 2,480               | 0.4228%        |
|  | audit anom              | 105                 | 0.0179%        |
|  | audit daemon            | 54                  | 0.0092%        |
| Файловая система<br>File System              | audit detections        | 41                  | 0.0070%        |
|  | syscheck                | 21,402              | 3.6484%        |
|  | syscheck file           | 21,066              | 3.5911%        |
|  | syscheck entry modified | 15,296              | 2.6073%        |
|  | syscheck entry added    | 5,116               | 0.8721%        |
| Безопасность<br>Security                     | syscheck entry deleted  | 654                 | 0.1115%        |
|  | pam                     | 3,308               | 0.5639%        |
|  | sudo                    | 1,378               | 0.2349%        |
|  | rootcheck               | 430                 | 0.0733%        |
|  | suricata                | 262                 | 0.0447%        |
|  | ids                     | 262                 | 0.0447%        |
|  | virustotal              | 165                 | 0.0281%        |
| Системные ошибки<br>System Errors            | vulnerability-detector  | 177                 | 0.0302%        |
|  | errors                  | 14,481              | 2.4684%        |
| Производительность<br>Performance            | configuration failure   | 5                   | 0.0009%        |
|  | performance_metric      | 7,186               | 1.2249%        |
| Сетевая активность<br>Network Activity       | promisc                 | 201                 | 0.0343%        |
|  | usb                     | 351                 | 0.0598%        |
| Агенты и мониторинг<br>Agents and Monitoring | agent flooding          | 108                 | 0.0184%        |
|  | service availability    | 116                 | 0.0198%        |
|  | agent restarting        | 5                   | 0.0009%        |
| Аутентификация<br>Authentication             | authentication success  | 1,807               | 0.3081%        |
|  | authentication_failed   | 83                  | 0.0141%        |
|  | invalid_login           | 2                   | 0.0003%        |
| Конфигурация ПО<br>Software Configuration    | dpkg                    | 984                 | 0.1677%        |
|  | config changed          | 741                 | 0.1263%        |
| Системные процессы<br>System Processes       | ossec                   | 22,410              | 3.8203%        |
|  | syslog                  | 20,404              | 3.4784%        |
|  | systemd                 | 29                  | 0.0049%        |
|  | cron                    | 2                   | 0.0003%        |
|  | local                   | 33                  | 0.0056%        |
| Веб-сервисы<br>Web Services                  | web                     | 12                  | 0.0020%        |
|  | nginx                   | 6                   | 0.0010%        |
| Дополнительные события<br>Additional Events  | chaos malware linux     | 895                 | 0.1526%        |
|  | sca                     | 262                 | 0.0447%        |
|  | linuxkernel             | 211                 | 0.0360%        |
|  | wazuh                   | 113                 | 0.0193%        |
|  | adduser                 | 17                  | 0.0029%        |
|  | attacks                 | 6                   | 0.0010%        |
|  | accesslog               | 6                   | 0.0010%        |
|  | access control          | 15                  | 0.0026%        |
|  | su                      | 6                   | 0.0010%        |
|  | sshd                    | 2                   | 0.0003%        |

Для получения визуализации данных событий использовался Vega в Wazuh, а именно в OpenSearch Dashboard (рис. 5).



**Рис. 5 – Результат исследований событий в системе мониторинга Wazuh**

**Fig. 5 – The result of research on events in the Wazuh monitoring system**

Общее количество событий, классифицированных с помощью фреймворка для работы с MITRE ATT&CK – 21109 (табл. 8). Основную часть событий составляют две техники: T1565.001 (72.49%): Манипуляции с данными; T1078 (8.56%): Использование легитимных учетных записей для доступа.

**Таблица 8. События по техникам MITRE ATT&CK**

**Table 8. MITRE ATT&CK Technical Events**

| Категория Category    | Техника (MITRE ATT&CK) Technique           | Количество Quantity | Доля (%) Share |
|-----------------------|--|---------------------|----------------|
| Impact                | T1565.001 (Stored Data Manipulation)       | 15,302              | 72.4895%       |
| Privilege Escalation  | T1548.003 (Sudo and Sudo Caching)          | 1,378               | 6.5270%        |
| Defense Evasion       | T1070.004 (File Deletion)                  | 654                 | 3.0975%        |
|                       | T1485 (Data Destruction)                   | 654                 | 3.0975%        |
|                       | T1562.001 (Disable Security Tools)         | 73                  | 0.3458%        |
| Initial Access        | T1078 (Valid Accounts)                     | 1,807               | 8.5601%        |
| Execution             | T1204.002 (Malicious File Execution)       | 895                 | 4.2394%        |
| Credential Access     | T1203 (Exploitation for Credential Access) | 22                  | 0.1042%        |
| Discovery             | T1040 (Network Sniffing)                   | 201                 | 0.9521%        |
|                       | T1057 (Process Discovery)                  | 5                   | 0.0237%        |
| Lateral Movement      | T1021.004 (SSH for Lateral Movement)       | 38                  | 0.1800%        |
| Credential Bruteforce | T1110.001 (Password Guessing)              | 62                  | 0.2937%        |
| Persistence           | T1098 (Account Manipulation)               | 2                   | 0.0095%        |
|                       | T1136 (Create Account)                     | 6                   | 0.0284%        |
| Другие                | T1499 (Endpoint Denial of Service)         | 2                   | 0.0095%        |
|                       | T1531 (Account Access Removal)             | 2                   | 0.0095%        |
|                       | T1547.006 (Kernel Modules)                 | 6                   | 0.0284%        |

По умолчанию в Wazuh используются ossec со стандартными правилами, отслеживающие активность в системе: sca, auditd (selinux permission check), сессии pam, изменение состояния wazuh агента. По умолчанию suricata не установлена в Astra Linux Special Edition. После установки и загрузки необходимых правил, события сетевой системы обнаружения вторжений записываются в журнал eve.json (рис. 5).

Пример команды для получения информации о срабатывании правила «A Network Trojan was detected»: `cat /var/log/suricata/eve.json | grep "A Network Trojan was detected" | tail -n 1 | jq -r "'\(.timestamp) \(.src_ip):\(.src_port) -> \(.dest_ip):\(.dest_port) [\(.alert.signature)]'"`.

Вывод команды: `2024-12-01T15:51:27.029925+0300 10.0.2.4:55696 -> 77.88.44.242:80 [ET_USER_AGENTS Suspicious User Agent (BlackSun)]`. По умолчанию в Astra Linux Special Edition установлен auditd, он отслеживает только события parsec и syslog (рис. 6). Команда для получения правил auditd и их количества через терминал Linux: `echo "$(for f in /etc/audit/rules.d/*.rules; do printf "%s:%d " "$(basename "$f")" "$(grep -cve '\s*(#|$)' "$f")" done)$(grep -vE '\s*(#|$)' /etc/audit/rules.d/audit.rules | tr '\n' ' ')"`. Вывод команды: `10-parsec.rules:4 astra-syslog.rules:36 audit.rules:18 github.rules:343 -b 8192 --backlog_wait_time 0 -f 1 -a exit,always -F arch=b64 -S kill -k kill_process -a exit,always -F arch=b64 -S exit_group -k kill_process`. Проведенное тестирование цепочки атак, имитирующей действия злоумышленника по методике MITRE ATT&CK, позволило выявить ключевые уязвимости

в мониторинге ОСН Astra Linux. Каждый этап атаки (табл. 6) соответствует конкретным пробелам в обнаружении, которые были устранены за счет доработки правил audit.d, OSSEC и Suricata. Основные компоненты системы:

1. Система аудита. Основу составляет встроенный механизм аудита auditd, который отслеживает все события, происходящие в системе, включая доступ к файлам, выполнение команд, изменения прав доступа и другие важные операции.
2. Системы обнаружения вторжений.
3. Сетевой уровень. Для мониторинга сетевого трафика и выявления подозрительных действий была установлена и настроена система обнаружения вторжений Suricata. Система анализирует пакеты данных, проходящих через сеть, и сигнализирует об обнаружении потенциальных сетевых атак или попыток несанкционированного доступа к защищаемой сети.
4. Узловой уровень. На уровне отдельных хостов была внедрена узловая система обнаружения вторжений OSSEC. Эта система контролирует состояние файлов, процессы, лог-файлы и другую информацию на каждом узле сети, помогая обнаружить попытки реализации техник MITRE ATT&CK.

Интеграции и улучшения OSSEC: система OSSEC была улучшена за счет добавления интеграций с сервисами анализа вредоносных программ:

Virustotal – это позволило проводить автоматический анализ подозрительного контента и файлов, загружаемых в систему, на предмет наличия вредоносного программного обеспечения.

Urlhaus – данная интеграция помогает отслеживать запросы к известным вредоносным URL-адресам, блокируя потенциальные угрозы ещё до их реализации.

Выявленные слабые места:

Недостаточная детекция подозрительных событий. Для устранения этой слабости были добавлены правила auditd для отслеживания изменений в ключевых файлах и выполнения подозрительных команд и правила OSSEC для мониторинга изменений в файловой системе и логов. Часть добавленных правил audit.d выглядят так:

```
-w /etc/sudoers -p wa -k sudoers_changes  
-w /etc/shadow -p wa -k shadow_changes  
-a always,exit -F arch=b64 -S execve -F exe=/usr/bin/useradd -k user_creation  
-a always,exit -F arch=b64 -S execve -F exe=/usr/bin/nano -k suspicious_editor
```

Часть добавленных правил OSSEC выглядят так:

```
<rule id="100001" level="7">  
<category>ossec</category>  
<decoded_as>syscheck</decoded_as>  
<description>Изменение в /etc/shadow</description>  
<group>system</group>  
<field name="file">/etc/shadow</field>  
</rule>
```

Отсутствие корреляции событий. Для устранения этой слабости были добавлены правила корреляции, через интеграцию Wazuh с плагином корреляции из OpenSearch для анализа последовательности событий. Так же корреляцию событий можно реализовать через правила OSSEC, используемые в Wazuh. Именно этот способ реализован в виду его простоты. Пример добавляемого правила корреляции:

```
<group name="correlation,attack_chain,local">  
<rule id="200200" level="15" frequency="1" timeframe="600">  
<decoded_as>json</decoded_as>  
<field name="data.audit.exe">  
/usr/sbin/useradd|usr/sbin/usermod|usr/sbin/adduser  
</field>  
<field name="data.audit.exe">  
bash|ip a|cat /etc/hosts|groups|systemctl status  
</field>  
<field name="data.audit.exe">
```

```
d8dd09b01eb4e363d88ff53c0aace04c39d822b7adba7a883970abbf72a77
</field>
<field name="data.audit.exe">/usr/bin/nano|usr/bin/sudo|useradd</field>
<field name="data.audit.exe">/usr/bin/scp|\.bash_history</field>
<description>
```

Корреляция многоэтапной атаки:

T1078.003 -> T1059.004 -> T1068 -> T1548.001 -> T1020/T1070.003

```
</description>
<group>correlation,attack_chain,mitre</group>
</rule>
</group>
```

Недостаточная реакция на IOC (Indicator of Compromise). Для устранения этой слабости были добавлены новые правила Suricata и OSSEC для отслеживания необходимых сетевых индикаторов компрометации из используемых техник MITRE ATT&CK. Пример добавляемого правила Suricata:

```
alert dns $HOME_NET any -> any any (msg: "IOC: DNS Query to Malicious FQDN"; dns.query;
dataset:isset, domains_iocs, type string, load /etc/suricata/rules/domains_iocs.list, memcap 10mb,
hashsize 1024; classtype: trojan-activity; sid:1000001; rev:1;) В файле
/etc/suricata/rules/domains_iocs.list указаны URL адреса вредоносных доменов. При-
мер добавляемого правила OSSEC:
```

```
<group name="local,ioc,fim">
<rule id="100700" level="15">
<decoded_as>json</decoded_as>
<field name="syscheck.md5_after">
d8dd09b01eb4e363d88ff53c0aace04c39d822b7adba7a883970abbf72a77
</field>
<description>IOC: Обнаружен файл с известным вредоносным SHA256-хешем</description>
<group>syscheck,malware_ioc</group>
</rule>
</group>
```

Конфигурации OSSEC, Suricata и Audit.d обеспечивают эффективное обнаружение и анализ подозрительной активности, описанной в цепочке атак. Выявленные уязвимости были устранены путем доработки правил и корреляции событий, что способствовало повышению общего уровня безопасности системы. Представлена лишь часть правил.

Предложенный подход позволяет обнаруживать критические этапы многоуровневых атак (T1068, T1548.001, T1020), что подтверждено тестированием цепочек MITRE ATT&CK (табл. 6). Единственный пропущенный этап — очистка истории команд (T1070.003), связан с ограничениями аудита bash-сессий. После адаптации правил доля ложных событий составила менее 0.03% от общего потока данных (табл. 7). Ложные события (audit\_anom, audit\_detections): 105 + 41 = 146. Доля ложных срабатываний:  $\frac{146}{586705} * 100 = 0,025\%$ . Это достигнуто за счет фильтрации шума, связанного с parsec и легитимными изменениями в системных файлах. Эффективность методики проверена на тестовых сценариях. «Базовые решения (Wazuh, OpenSearch) не учитывают специфику ОССН (например, события parsec), что приводит к ложным срабатываниям. Предложенная методика устранила этот недостаток за счет:

1. Адаптации 277 правил audit.d (табл. 3).
2. Введения 15 корреляционных правил OSSEC (табл. 5).
3. Интеграции с Suricata (табл. 4).

Автоматизация проверки через VirusTotal сократила время анализа для 100 событий категории chaos\_malware\_linux (895 случаев). Например, проверка хеша файла (рис. 2) с помощью URLhaus заняла менее 3 секунд. Полученные данные подтверждают, что адаптированные правила обеспечивают высокую эффективность обнаружения угроз (91,7%) и минимальный уровень ложных срабатываний (0,025%). Однако требуется развитие методов анализа для сложных многоэтапных атак.

$$\text{Эффективность} = \frac{\text{Обнаруженные этапы}}{\text{Всеэтапы}} * 100\% = \frac{11}{12} * 100\% = 91,7\%$$

В табл. 6 перечислено 12 этапов атаки, согласно техникам MITRE ATT&CK. Система обнаружила все этапы, кроме одного – T1070.003 (очистка истории команд).

**Вывод.** В работе предложен метод интеграции и адаптации open-source средств мониторинга (Wazuh, OSSEC, Suricata) для эффективного обнаружения аномальной пользовательской активности в ОС Astra Linux Special Edition. Это решает проблему отсутствия специализированных инструментов, совместимых со встроенными механизмами защиты ОССН (мандатным контролем, аудитом Parsec).

Предложенный метод основан на интеграции адаптированных правил audit.d, OSSEC и Suricata с платформой Wazuh, а также с VirusTotal и URLhaus, что обеспечивает соответствие требованиям NIST SP 800-92 и приказа ФСБ №281 за счет гибкой настройки под встроенные механизмы защиты, снижения ложных срабатываний, корреляции событий по тактикам MITRE ATT&CK. Архитектура протестирована в разных средах и соответствует ГОСТ Р 59548-2022.

Таким образом, работа вносит вклад в развитие методов мониторинга для отечественных операционных систем, имеет практическое значение для организаций, переходящих на ОССН, способствует снижению рисков компрометации за счет превентивного обнаружения аномалий, а также соответствует государственным стандартам безопасности.

#### Библиографический список:

1. Филимонова А.В., Заливина Д.А, Митрофанова Т. В. О социальной инженерии в кибербезопасности // Информационные технологии. Проблемы и решения, 2020. № 1 (10). С. 139-144.
2. Назарян А.К., Карцан И.Н. Современные кибератаки: классификация и способы защиты // Информатика. Экономика. Управление. 2025. Т. 4, № 1. С. 1001-1007.
3. Сафонова Е.Г., Егорова А.О., Маврин С.А. Вопрос актуальности проблемы целенаправленных кибератак на критическую информационную инфраструктуру // Энергетические установки и технологии. 2025. Т. 11, № 1. С. 110-116.
4. Создание собственного SOC при помощи классификации MITRE и opensource стека ELK / Степанов Я.В., Копышева Т.Н., Митрофанова Т.В. и др. // Информационные технологии в науке, управлении и образовании: междисциплинарный подход и тенденции развития: сб. матер. Всерос. науч.-практ. конф., 12 ноября 2021 года. Дмитровград: Изд-во ДИТИ, 2021. С. 229-236.
5. Ермак К.К. Методы защиты от кибератак: современные подходы и технологии // Международный студенческий научный вестник. 2025. № 1. С. 4.
6. Аль-Кадхи М.А.А.А. Кибератаки: растущие угрозы, стратегии повышения осведомлённости и эффективные меры защиты // Актуальные исследования. 2025. № 7-1(242). С. 71-73.
7. Мукашев О. Методы защиты от распространенных типов кибератак // Интернаука. 2025. № 18-4(382). С. 65-68.
8. Подсистема предупреждения компьютерных атак на объекты критической информационной инфраструктуры: анализ функционирования и реализации / Котенко И.В., Сасенко И.Б., Захарченко Р.И., Величко Д.В. // Вопросы кибербезопасности, 2023. № 1 (53). С. 13-27.
9. Нурьяров Р.Р. Современные методы и инструменты выявления целевых кибератак // Интернаука. 2025. № 12-1(376). С. 36-39.
10. Исакова Т.А. Безопасность информации: распределенная система обнаружения атак // Актуальные вопросы современной экономики. 2025. № 3. С. 596-600.
11. Нурьяров Р.Р. Архитектура SOC: повышение зрелости SOC для улучшения механизмов обнаружения и предотвращения кибератак // Интернаука. 2025. № 17-2(381). С. 5-16.
12. Порядок реагирования на наиболее популярные способы реализации кибератак в соответствии с техниками матрицы MITRE ATT&CK / Н.А. Николаев, А.Н. Вишнякова, И.В. Горбачев, О.М. Голембиовская // Информационная безопасность и защита персональных данных. Проблемы и пути их решения: сб. матер. и докл. XVI межрегион. науч.-практ. конф., Брянск, 29 апреля 2024 года. Брянск: Изд-во Брянск. техн. ун-та, 2024. С. 196-201.
13. Иванов А. С. Использование алгоритмов обработки естественного языка для идентификации техник из матрицы MITRE ATT&CK // Нанотехнологии. Информация. Радиотехника (НИР-24): Материалы Всерос. молодеж. науч.-практ. конф., Омск, 18 апреля 2024 года. Омск: Изд-во Омск. техн. ун-та, 2024. С. 68-71.
14. Zambianco M., Facchinetti C., Siracusa D. A Proactive Decoy Selection Scheme for Cyber Deception using MITRE ATT&CK // Computers & Security. 2025. Vol. 148. P. 104144.
15. Zhang Sh., Xue X. DeepOP: A Hybrid Framework for MITRE ATT&CK Sequence Prediction via Deep Learning and Ontology // Electronics. 2025. Vol. 14, No. 2. P. 257.
16. Головашов С., Агатий И. Подходы в обеспечении защиты информации при использовании Astra Linux Special Edition во встроенном оборудовании // Системный администратор. 2024. № 5(258). С. 26-41.
17. Зима В.М., Крюков Р.О. Подход к контролю действий привилегированных пользователей в критически важных автоматизированных системах // Вопросы оборонной техники. Серия 16: технические средства противодействия терроризму, 2021. С. 72-82.
18. Мылицын Р.Н, Девянин П.Н. Практика построения информационных систем в защищенном исполнении на базе операционной системы ASTRA LINUX SPECIAL EDITION // Состояние и перспективы развития современной

- науки по направлению «Информационная безопасность». Сб. статей II Всероссийской научно-технической конференции. Т. 2. Анапа: Изд-во ФГАУ «Военный инновационный технополис "ЭРА"», 2020. С 448-453.
19. A Comprehensive Review of Cyber Security Vulnerabilities, Threats, Attacks, and Solutions // Ömer Aslan, Semih Serkant Aktug, Merve Ozkan Okay, Abdullah Asim Yilmaz, Erdal Akin / March 2023 // Electronics 12(6):1-42 // DOI:10.3390/electronics12061333.
  20. Review and insight on the behavioral aspects of cybersecurity // Rachid Ait Maalem Lahcen, Bruce Caulkins, Ram Mohapatra, Manish Kumar // April 2020 Cybersecurity 3(1) // DOI:10.1186/s42400-020-00050-w.
  21. Об утверждении требований по обеспечению безопасности значимых объектов критической информационной инфраструктуры российской федерации. Приказ ФСТЭК России N 239 от 25 декабря 2017 г.
  22. О мерах по обеспечению технологической независимости и безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации. Указ Президента Российской Федерации от 30.03.2022 г. № 166.
  23. О дополнительных мерах по обеспечению информационной безопасности Российской Федерации. Указ Президента Российской Федерации от 01.05.2022 г. № 250.
  24. ГОСТ Р 59548— 2022. Защита информации. Регистрация событий безопасности. Требования к регистрируемой информации.
  25. Guide to Computer Security Log Management NIST SP 800-92
  26. <https://attack.mitre.org/matrices/enterprise/linux/> (дата обращения: 23.07.2025). Matrix Enterprise|MITRE ATT&CK [Электронный ресурс]: Linux Matrix.
  27. Приказ ФСБ России от 19 июня 2019 г. № 281 «Об утверждении Порядка, технических условий установки и эксплуатации средств, предназначенных для обнаружения, предупреждения и ликвидации последствий компьютерных атак и реагирования на компьютерные инциденты, за исключением средств, предназначенных для поиска признаков компьютерных атак в сетях электросвязи, используемых для организации взаимодействия объектов критической информационной инфраструктуры Российской Федерации».

#### References:

1. Filimonova A.V., Zalivina D.A., Mitrofanova T.V. On Social Engineering in Cybersecurity. *Information Technologies. Problems and Solutions*. 2020; 1 (10): 139-144. (In Russ)
2. Nazaryan A.K., Kartsan I.N. Modern Cyberattacks: Classification and Protection Methods. *Informatics. Economics. Management*. 2025; 4; 1: 1001-1007. (In Russ)
3. Safonova E.G., Egorova A.O., Mavrin S.A. The relevance of the problem of targeted cyberattacks on critical information infrastructure. *Energy Plants and Technologies*. 2025; 11; 1: 110-116. (In Russ)
4. Creating your own SOC using the MITRE classification and the ELK opensource stack / Stepanov Y.V., Kopysheva T.N., Mitrofanova T.V., et al. // Information Technologies in Science, Management, and Education: An Interdisciplinary Approach and Development Trends: Collection of Materials. All-Russian Scientific and Practical Conference, November 12, 2021. Dimitrovgrad: Publishing House of DITI, 2021: 229-236. (In Russ)
5. Ermak K.K. Methods of protection against cyberattacks: modern approaches and technologies. *International student scientific bulletin*. 2025; 1: P. 4. (In Russ)
6. Al-Kadhi M.A.A.A. Cyberattacks: Growing Threats, Awareness-Raising Strategies, and Effective Protection Measures. *Current Research*. 2025; 7-1(242): 71-73. (In Russ)
7. Mukashev O. Methods of protection against common types of cyberattacks. *Internauka*. 2025;18-4(382):65-68 (In Russ)
8. The Subsystem of Computer Attacks Prevention on Critical Information Infrastructure Facilities: Analysis of Functioning and Implementation / Kotenko I.V., Saenko I.B., Zakharenko R.I., Velichko D.V. *Cybersecurity Issues*. 2023; 1 (53): 13-27. (In Russ)
9. Nur'yarov R.R. Modern Methods and Tools for Identifying Targeted Cyberattacks. *Internauka*. 2025; 12-1(376): 36-39. (In Russ)
10. Isakova T.A. Information Security: Distributed System for Detecting Attacks. *Actual Issues of Modern Economics*. 2025; 3: 596-600. (In Russ)
11. Nur'yarov R.R. SOC Architecture: Enhancing SOC Maturity to Improve Cyber Attack Detection and Prevention Mechanisms. *Internauka*. 2025; 17-2(381): 5-16. (In Russ)
12. The procedure for responding to the most popular methods of implementing cyber attacks in accordance with the techniques of the MITRE ATT&CK matrix / N.A. Nikolayev, A.N. Vishnyakova, I.V. Gorbachev, O.M. Golembiovskaya // Information security and personal data protection. Problems and ways to solve them: collection of materials. and dokl. XVI interregion. Scientific and Practical conference, Bryansk, April 29, 2024. Bryansk: Publishing house Bryansk. tech. University, 2024: 196-201. (In Russ)
13. Ivanov A.S. The use of natural language processing algorithms to identify techniques from the MITRE ATT&CK matrix // Nanotechnology. Information. Radio engineering (NIR-24): Materials of the All-Russian Thank you. Scientific and Practical conference, Omsk, April 18, 2024. Omsk: Publishing house of Omsk. tech. University, 2024: 68-71. (In Russ)
14. Zambianco M., Facchinetti C., Siracusa D. A Proactive Decoy Selection Scheme for Cyber Deception using MITRE ATT&CK. *Computers & Security*. 2025; 148: 104144.
15. Zhang Sh., Xue X. DeepOP: A Hybrid Framework for MITRE ATT&CK Sequence Prediction via Deep Learning and Ontology. *Electronics*. 2025; 14; 2: P. 257.
16. Golovashov S., Agaty I. Approaches to Ensuring Information Security When Using Astra Linux Special Edition in Embedded Equipment. *System Administrator*. 2024; 5(258): 26-41. (In Russ)
17. Zima V.M., Kryukov R.O. Approach to Controlling the Actions of Privileged Users in Critical Automated Systems. *Issues of Defense Technology*. Series 16: Technical Means of Countering Terrorism, 2021: 72-82. (In Russ)
18. Mylitsyn R.N., Devyanin P.N. The Practice of Building Information Systems in a Protected Design Based on the ASTRA LINUX SPECIAL EDITION Operating System // The State and Prospects of Modern Science Development in the Field of Information Security. Collection of Articles from the II All-Russian Scientific and Technical Conference. Vol. 2. Анапа: Military Innovative Technopolis ERA, 2020: 448-453. (In Russ)

19. A Comprehensive Review of Cyber Security Vulnerabilities, Threats, Attacks, and Solutions // Ömer Aslan, Semih Serkant Aktug, Merve Ozkan Okay, Ab-dullah Asim Yılmaz, Erdal Akin / March 2023 // Electronics 12(6):1-42 // DOI:10.3390/electronics12061333.
20. Review and insight on the behavioral aspects of cybersecurity // Rachid Ait Maalem Lahcen, Bruce Caulkins, Ram Mohapatra, Manish Kumar / April 2020 // Cyber-security 3(1) // DOI:10.1186/s42400-020-00050-w.
21. On Approval of Requirements for Ensuring the Security of Significant Objects of the Critical Information Infrastructure of the Russian Federation. Order of the FSTEC of Russia No. 239 of December 25, 2017. (In Russ)
22. On Measures to Ensure the Technological Independence and Security of the Critical Information Infrastructure of the Russian Federation. Decree of the President of the Russian Federation No. 166 of March 30, 2022. (In Russ)
23. On Additional Measures to Ensure the Information Security of the Russian Federation. Decree of the President of the Russian Federation No. 250 of May 1, 2022. (In Russ)
24. GOST R 59548-2022. Information Protection. Registration of Security Events. Requirements for Registered Information. (In Russ)
25. Guide to Computer Security Log Management NIST SP 800-92.
26. <https://attack.mitre.org/matrices/enterprise/linux/> (accessed July 23, 2025). Matrix Enterprise[MITRE ATT&CK [Electronic resource]: Linux Matrix.
27. Order of the FSB of Russia dated June 19, 2019 No. 281 "On approval of the Procedure, technical conditions for the installation and operation of tools designed to detect, prevent, and eliminate the consequences of computer attacks and respond to computer incidents, with the exception of tools designed to search for signs of computer attacks in telecommunication networks used to organize the interaction of critical information infrastructure facilities of the Russian Federation" (In Russ)

#### **Сведения об авторах:**

Андреев Илья Игоревич, аспирант кафедры математического и аппаратного обеспечения информационных систем; andreev054@mail.ru; ORCID: 0000-0004-7624-5829.

Иванов Сергей Олегович, старший преподаватель кафедры математического и аппаратного обеспечения информационных систем; v101-11@mail.ru; ORCID: 0000-0003-3918-3919.

Копышева Татьяна Николаевна, кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой математического и аппаратного обеспечения информационных систем; tn\_pavlova@mail.ru; ORCID: 0000-0003-3392-1431.

Никандров Максим Валерьевич, кандидат технических наук, директор ООО «Интеллектуальные сети», nikandrov@igrids.ru; ORCID: 0000-0001-6846-3384.

Смирнова Татьяна Николаевна, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры математического и аппаратного обеспечения информационных систем; smirnova-tanechka@yandex.ru; ORCID: 0000-0001-6687-9415.

#### **Information about the authors:**

Ilya I. Andreev, Graduate Student, Department of Mathematical and Hardware Support of Information Systems, andreev054@mail.ru; ORCID: 0000-0004-7624-5829.

Sergey O. Ivanov, Senior Lecturer, Department of Mathematical and Hardware Support of Information Systems, v101-11@mail.ru; ORCID: 0000-0003-3918-3919.

Tatyana N. Kopysheva, Cand. Sci. (Physical and Mathematical), Assoc. Prof., Head of the Department of Mathematical and Hardware Support of Information Systems, tn\_pavlova@mail.ru; ORCID: 0000-0003-0935-0384.

Maksim V. Nikandrov, Cand. Sci. (Eng.), Director of Intelligent Networks LLC, nikandrov@igrids.ru; ORCID: 0000-0001-6846-3384.

Tatiana N. Smirnova, Cand. Sci. (Physical and Mathematical), Assoc. Prof., Assoc. Prof., Department of Mathematical and Hardware Support of Information Systems, smirnova-tanechka@yandex.ru; ORCID: 0000-0001-6687-9415.

#### **Конфликт интересов/Conflict of interest.**

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

**Поступила в редакцию/Received 23.07.2025.**

**Одобрена после рецензирования/Revised 11.09.2025.**

**Принята в печать/Accepted for publication 30.10.2025.**

## Математическое моделирование оценки влияния размещения технических средств организации дорожного движения на безопасность

М.А. Арутюнян

Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова,  
198035, г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7, Россия

**Резюме. Цель.** Целью исследования является определение ключевых показателей, влияющих на размещение технических средств организации дорожного движения, разработка математических моделей, а также алгоритмов для их количественной оценки. **Метод.** Исследование основано на экспертных методах, в частности, методе анализа иерархий Саати, натурного и вычислительного моделирования. **Результат.** Определены два основных показателя безопасности дорожного движения, которые играют ключевую роль в оценке риска на автомобильных дорогах. Определены показатели для оценки уровня аварийности, а также предложена модель для определения общей оценки риска аварий на возможных местах размещения технических средств организации дорожного движения. Предложен алгоритм кластеризации возможных мест размещения технических средств организации дорожного движения. **Вывод.** Разработанная модель оценки тяжести последствий дорожно-транспортных происшествий позволяет учитывать сложные взаимосвязи между их типами и последствиями, что является важным шагом в направлении создания более объективной системы оценки риска на автомобильных дорогах. Предложенный алгоритм группировки потенциальных мест установки технических средств организации дорожного движения может частично компенсировать недостаток данных об уровне безопасности дорожного движения и повысить обоснованность оценки изменения его уровня при установке технических средств организации дорожного движения.

**Ключевые слова:** математические модели, численные методы, алгоритм, технические средства организации дорожного движения, безопасность дорожного движения

**Для цитирования:** М.А. Арутюнян. Математическое моделирование оценки влияния размещения технических средств организации дорожного движения на безопасность. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025;52(4):39-48. DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-4-39-48.

## Mathematical modeling of the assessment of the impact of placement of technical means of road traffic organization on safety

M.A. Arutiunian

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,  
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035, Russia

**Abstract. Objective.** The aim of the study is to identify key indicators influencing the placement of technical means of traffic management, and to develop mathematical models and algorithms. **Method.** The study is based on expert methods: Saaty hierarchy process analysis, natural and computational modeling. **Result.** Two main indicators of road safety have been identified, which play a key role in assessing the risk on motorways. Indicators for assessing the accident rate have been defined, and a model has been proposed for determining the overall assessment of the risk of accidents at possible locations of technical means of traffic management. Proposed an algorithm for clustering possible locations for the placement of technical means for organizing traffic. **Conclusion.** The created model for evaluating the impact of road accidents considers intricate connections between accident types and outcomes, representing a significant advance in building a more precise and impartial system for gauging road risk. The suggested method for categorizing

prospective sites for traffic control technology can offset limitations in statistical information concerning road safety and enhance the reliability of assessing safety improvements resulting from these technologies.

**Keywords:** mathematical models, numerical methods, algorithm, technical means of traffic organization, road safety

**For citation:** M.A. Arutiunian. Mathematical modeling of the assessment of the impact of placement of technical means of road traffic organization on safety. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2025; 52(4):39-48. (In Russ) DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-4-39-48.

**Введение.** В статье представлен один из промежуточных научных результатов, полученных в диссертационной работе, целью которой является повышение безопасности дорожного движения за счет рационального размещения технических средств организации дорожного движения. При определении целесообразных мест установки технических средств организации дорожного движения могут быть использованы разные оценочные критерии, учитывающие как непосредственные параметры аварийности, так и факторы, оказывающие косвенное воздействие на вероятность возникновения аварийных ситуаций.

**Постановка задачи.** В связи с недостатком существующих индикаторов, полноценно отражающих фактическую степень аварийности, предлагается разработка специальных моделей для оценки соответствующего показателя. Указанные модели необходимо разрабатывать с учетом не просто статистики дорожно-транспортных происшествий, зафиксированных на конкретном отрезке пути за определенный период, а с обязательным анализом совокупного вреда, который причиняют аварии как отдельным гражданам, так и обществу в целом. Это позволит более точно определить проблемные участки и разработать эффективные меры по снижению аварийности и минимизации негативных последствий. Оценка безопасности дорожного движения на исследуемом участке дороги является сложной задачей из-за ограниченной доступности данных по каждому возможному месту размещения. Учитывая схожесть характеристик транспортных и пешеходных потоков, а также условия, способствующие возникновению дорожно-транспортных происшествий на различных возможных местах размещения, можно предположить, что меры по обеспечению безопасности дорожного движения также имеют общие черты. Это позволяет распространять полученные оценки на аналогичные случаи. В связи с этим необходимо определить показатели схожести различных возможных мест размещения.

**Методы исследования.** Проанализируем основные показатели, влияющие на безопасность дорожного движения. Одним из таких показателей является интенсивность дорожного движения, которая может быть количественно охарактеризована посредством оценки потока транспортных средств, проходящих через определенный участок дороги или ее сечения в течение единицы времени, учитывая движение в обоих направлениях. Она делится на среднегодовую суточную интенсивность, расчетную перспективную интенсивность и часовую интенсивность движения. При анализе безопасности дорожного движения целесообразно использовать показатель часовой интенсивности. Показатель можно рассчитать по следующей формуле:

$$N_{\text{ч}} = N_{\text{с}} * \alpha_{\text{ч}}, \quad (1)$$

где  $N_{\text{с}}$  обозначает среднегодовую суточную интенсивность движения, выраженную в авт/сут;  $\alpha_{\text{ч}}$  – это доля транспортных средств, которые прошли через данный участок дороги в течение одного часа, от общего суточного количества автомобилей. В соответствии с литературными источниками, значение  $\alpha_{\text{ч}}$  можно принять равной 0,076 [1].

Анализ результатов исследований, представленных в [2], обнаруживает прямую корреляцию между дорожным движением и частотой дорожно-транспортных инцидентов на определенной секции дороги. Это свидетельствует о том, что рост интенсивности движения приводит к соответствующему увеличению числа дорожно-транспортных инцидентов. Средняя скорость движения транспортного потока оказывает существенное влияние на тяжесть последствий дорожно-транспортных инцидентов. Данные, представленные в [3],

демонстрируют прямую взаимосвязь между средней скоростью движения и вероятностью дорожно-транспортных инцидентов. В связи с этим одновременное использование двух указанных характеристик для оценки обеспечения безопасности может быть неэффективным, поскольку эти два параметра тесно связаны. Загруженность автомобильной дороги, как указано в [4], может быть количественно оценена с помощью коэффициента загруженности  $g$ , который характеризует уровень использования дорожной инфраструктуры и позволяет оценить эффективность дорожного движения. Коэффициент загруженности рассчитывается по следующей формуле:  $g = n/z$ , (2)

где  $n$  – это интенсивность движения на рассматриваемом участке, то есть количество транспортных средств, проходящих через данный участок за единицу времени, а  $z$  – пропускная способность этого участка, то есть максимальное количество транспортных средств, которое может пройти через данный участок за единицу времени.

Статистические исследования, проведенные ранее, свидетельствуют о прямой зависимости между загруженностью дорог и количеством дорожно-транспортных происшествий [4]. Это подтверждается результатами корреляционного анализа, которые показали высокую степень взаимосвязи между этими двумя показателями (коэффициент корреляции составляет 0,94). Кроме того, поскольку пропускная способность дороги является постоянной величиной, а коэффициент загруженности и интенсивность движения связаны линейно, то использование этих двух параметров одновременно для оценки безопасности дорожного движения может быть неэффективным.

В результате проведенного анализа, было выявлено, что коэффициент загруженности автомобильной дороги ( $g$ ) является важной динамической характеристикой, напрямую влияющей на безопасность дорожного движения, ввиду чего из имеющихся показателей данной категории в ходе дальнейшей работы рекомендуется использовать именно её. Это связано с тем, что коэффициент загруженности отражает текущий уровень использования дорожной инфраструктуры и позволяет оценить эффективность дорожного движения в реальном времени. Результаты анализа подтверждают, что коэффициент загруженности играет одну из ключевых ролей в обеспечении безопасности дорожного движения, и его применение может способствовать созданию эффективных стратегий по предупреждению дорожно-транспортных инцидентов. Для увеличения эффективности применения данного параметра в контексте диссертационной работы предложено учесть такой важный параметр как «точки притяжения» – пункты сосредоточения интересов пешеходов, определяющих маршруты и цели их перемещений. Это означает, что учитывается не только объем транспортного потока, но и влияние мест, привлекающих пешеходов, на движение.

Коэффициент загруженности (2) с учетом влияния пешеходов и «точек притяжений» можно представить в следующем виде:  $g = \frac{n \times (1 + P \times A)}{z}$ ,

где  $P$  – коэффициент, учитывающий влияние пешеходов (например, количество пешеходов, пересекающих дорогу в неполюженных местах),  $A$  – коэффициент «точек притяжения», отражающий вероятность того, что пешеходы будут пересекать дорогу в этом месте.

В рамках статистического анализа выявлены зависимости между параметрами дорожного движения. Хотя класс автомобильной дороги не имеет прямого влияния на безопасность, он оказывает значительное косвенное воздействие на нее через такие факторы, как интенсивность и средняя скорость, которые, в свою очередь, влияют на уровень загруженности дороги. Это связано с тем, что класс дороги определяет ее технические характеристики, такие как ширина, количество полос и тип покрытия, которые влияют на интенсивность и среднюю скорость. В свою очередь, эти параметры напрямую влияют на уровень загруженности, который является одним из основных факторов, влияющих на безопасность дорожного движения. Соответственно, выполнение прямой оценки безопасности дорожного движения с учетом классов автомобильных дорог не является действенной. Уровень сложности дорожного участка определяется наличием зон конфликтного взаимодействия, включающие точки разветвления, слияния и пересечения транспортных потоков, а также зоны пересечения транспортного и пешеходного потоков [5]. Согласно результатам

статистического анализа, именно такие участки демонстрируют наибольшую концентрацию дорожно-транспортных инцидентов. Более того, рост интенсивности движения в пределах зон конфликта напрямую коррелирует с увеличением вероятности возникновения ДТП. Следовательно, уровень аварийности на участке дороги находится в прямой зависимости от его структурной сложности, которая определяется количеством, расположением и типом конфликтных точек. Оценка сложности участка автомобильной дороги может быть проведена с помощью различных подходов [6, 7]. В РФ для количественной оценки сложности дорожного участка, на котором планируется размещение объекта, в основном используется методика, описанная в [8], согласно которой данный показатель может быть рассчитан по следующей формуле:

$$m = \sum_{i=1}^{n^c} \sigma_i * m_i, \quad (3)$$

где  $\sigma_i$  – коэффициент сложности  $i$ -го типа конфликтных точек, характеризующий уровень риска дорожно-транспортных инцидентов;  $m_i$  – количество конфликтных точек  $i$ -го типа, присутствующих на исследуемом участке;  $n^c$  – общее количество типов конфликтных точек.

Коэффициент сложности дорожной сети может быть определен с помощью различных методологических подходов, каждый из которых имеет сильные и слабые стороны. Например, источники [7,8] предлагают два альтернативных способа определения коэффициента, которые могут быть применены в зависимости от конкретных задач и целей. Анализ результатов свидетельствует о том, что оценка риска на автомобильных дорогах основана на комплексном подходе, учитывающем количественные и качественные параметры конфликтных точек. Существующие методы оценки отличаются подходами к определению коэффициента сложности, присваиваемого каждому типу конфликтных точек. Учитывая это разнообразие, разработка гибкой модели, позволяющей пользователям задавать значения коэффициентов в соответствии с выбранным ими методом оценки, представляется логичным и целесообразным шагом. Такой подход способствует созданию более адаптивных и эффективных инструментов для анализа и прогнозирования дорожного риска. Исследование факторов, влияющих на аварийность, позволило выявить два основных индикатора безопасности дорожного движения, которые играют ключевую роль в оценке риска на автомобильных дорогах. Анализ количества аварий за отчетный период на исследуемом участке (КАТ) и социально-экономического ущерба от дорожно-транспортных происшествий за тот же период (СЭУ) свидетельствует о том, что эти показатели являются наиболее значимыми для оценки аварийности. Поскольку нормативно-правовые акты регулируют использование этих показателей, целесообразно разработать комплексный подход к оценке КАТ и СЭУ. Это позволит обеспечить объективность и гибкость в оценке аварийности, учитывая различные аспекты дорожного движения.

Нами определены различные индикаторы  $K^d$ , каждый из которых отражает уникальные аспекты риска дорожно-транспортных происшествий. Однако, для получения полной картины безопасности дорожного движения, необходимо учитывать все эти индикаторы одновременно. Гетерогенность индикаторов и разнообразие тяжести последствий, которые они отражают, создают значительные препятствия для их одновременного применения. Отсутствие унифицированного подхода к использованию этих индикаторов может привести к следующим негативным последствиям: снижение эффективности функционирования систем обеспечения безопасности дорожного движения; неполная оценка риска дорожно-транспортных происшествий на рассматриваемой территории; нерациональное распределение технических ресурсов для организации дорожного движения. Следовательно, необходимо разработать модель, которая позволяет учитывать все индикаторы  $K^d$  одновременно, обеспечивая полную и объективную оценку безопасности дорожного движения. Данная модель направлена на разработку количественного подхода к оценке риска дорожно-транспортных происшествий, учитывая тяжесть последствий таких событий. Переход от качественной к количественной оценке является ключевым для принятия эффективных решений в области безопасности дорожного движения, где точность и объективность

оценки риска играют решающую роль. В этом контексте могут быть полезны экспертные методы, описанные в исследованиях [9,20].

Коэффициент социально-экономического ущерба ( $K_2^d$ ) определяется как усредненный показатель социально-экономических потерь, связанных с различными типами аварий, который затем нормируется по отношению к общему количеству аварий на исследуемом участке. Формула для расчета коэффициента  $K_2^d$  имеет следующий вид:

$$K_2^d = \frac{\sum_{i=1}^{n_a} \Pi_i}{n_a}, \quad (4)$$

где  $\Pi_i$  обозначает социально-экономические потери от  $i$ -й аварии, а  $n_a$  представляет собой общее количество аварий на рассматриваемом участке. Более подробное описание методики расчета данного коэффициента приведено в источнике [10].

В контексте оптимизации размещения технических средств организации дорожного движения серьезность последствий дорожно-транспортных происшествий будет охарактеризована показателем  $K^d = K_1^d$ , представляющим собой вектор из пяти компонент  $\{k_1^d, \dots, k_5^d\}$ . В связи с неоднородностью компонент для объективной оценки их значимости применим метод анализа иерархий Саати. Анализ показал, что для достоверного моделирования дорожно-транспортных происшествий можно ограничиться одним репрезентативным показателем каждого типа, учитывая как прямые, так и косвенные факторы, влияющие на аварийность. Это упрощает модель, сокращает количество переменных и сохраняет точность результатов. В рамках предложенной модели предлагается интегральная оценка безопасности дорожного движения, которая напрямую связана с уровнем безопасности на возможном месте установки технических средств организации дорожного движения [11].

Оптимизация указанных параметров одновременно представляет собой сложную задачу из-за их разнородности. Чтобы решить эту проблему, предлагается разработать комплексный показатель тяжести последствий дорожно-транспортных происшествий, который может быть выражен в виде комбинации параметров  $k_1^d - k_5^d$ . Показатель безопасности дорожного движения для  $j$ -ого возможного места размещения будет определен как обратный к нему показатель:

$$K(s_j) = \sum_{i=1}^5 \alpha_i * k_i^d, \quad (5)$$

где  $\alpha_i$  – обозначает весовые коэффициенты, отражающие значимость соответствующих показателей  $k_1^d - k_5^d$  для возможного места размещения  $s_j$ .

Ввиду ограничений, связанных с прямым измерением коэффициентов  $\alpha_i$ , предлагается использовать экспертные подходы для их определения. В частности, можно применить метод анализа иерархий Саати [12,13], который основан на получении оценок на основе сравнительного анализа парных сочетаний показателей. Для оценки тяжести последствий ДТП будут использоваться следующие критерии сравнения:

$$e_{ij}^d = \begin{cases} 1, e_i^d \text{ и } e_j^d \text{ имеют одинаковую тяжесть} \\ 3, e_i^d \text{ незначительно превышает } e_j^d \text{ по тяжести} \\ 5, e_i^d \text{ значительно превышает } e_j^d \text{ по тяжести} \\ 7, e_i^d \text{ явно превосходит } e_j^d \text{ по тяжести} \\ 9, e_i^d \text{ абсолютно превосходит } e_j^d \text{ по тяжести} \end{cases}$$

На основе ранжирования, определенного экспертами, формируется матрица парных сравнений относительной важности индикаторов  $E^d$ , в которой элементы  $e_{ij}^d = \frac{1}{e_{ji}^d}$ .

Для определения приоритетов индикаторов  $E^d$ , рассчитывается вектор приоритетов  $V_{E^d} = (\alpha_1, \dots, \alpha_5)$ , представляющий собой нормированный собственный вектор матрицы  $E^d$ , соответствующий максимальному собственному значению  $\lambda_{max}$ . Для нахождения вектора приоритетов  $V_{E^d}$  необходимо решить линейное уравнение:

$$E^d * V_{E^d} = \lambda_{max} * V_{E^d}. \quad (6)$$

Из уравнения (6) видно, что для определения весовых коэффициентов следует исследовать спектральные свойства матрицы  $E^d$ . Поскольку размерность матрицы  $E^d$

невелика, задача нахождения собственных значений и собственных векторов может быть решена с помощью стандартных численных методов, описанных в источнике [1414].

**Обсуждение результатов.** Разработаем математические модели и численные методы для оценки результативности использования технических средств организации дорожного движения (ТСОДД) в качестве одного из инструментов обеспечения и повышения безопасности дорожного движения. В связи с имеющейся высокой неопределенностью данных, решение рассматриваемой задачи предлагается получить исходя из предположения о том, что на всех потенциальных местах размещения ТСОДД, характеризующихся сходными значениями показателей сложности автомобильной дороги и коэффициента загруженности, наблюдаются аналогичные уровни безопасности. Следовательно, можно предположить, что использование таких ТСОДД имеет приблизительно равное воздействие на изменение уровня аварийности в различных зонах размещения. Для эффективного решения исследуемой задачи нужно разработать методы группировки возможных мест размещения ТСОДД, позволяющие экстраполировать уже существующие оценки безопасности дорожного движения и влияния ТСОДД на изменение уровня аварийности с одного на другие, входящие в ту же категорию. С этой целью можно использовать один из методов кластеризации, описанных в [15]. Решение задачи кластеризации относительно исследуемой проблемы включает в себя четыре основных этапа:

1. Определение критерия оценки сходства объектов, в данном случае, потенциальных зон расположения ТСОДД, на основе которого будет проводиться группировка;
2. Разработка алгоритма кластеризации, позволяющего сгруппировать потенциальные зоны расположения ТСОДД по кластерам с учетом их сходства;
3. Рефинирование состава полученных кластеров с целью обеспечения их внутренней однородности и внешней гетерогенности;
4. Проверка адекватности полученного результата, чтобы убедиться в его соответствии реальной ситуации и обеспечении достоверности выводов [16-20].

В ранее проведенном анализе были выделены ключевые характеристики возможных мест размещения ТСОДД, которые могут быть сгруппированы в два основных класса: индикаторы безопасности дорожного движения, оказывающие непосредственное влияние и опосредованное влияние на уровень безопасности дорожного движения. Из-за ограничений в доступе к данным о прямых показателях безопасности дорожного движения, было принято решение ограничить кластеризацию только косвенными факторами, оказывающими влияние на уровень безопасности. Индикатор, используемый для оценки схожести мест размещения технических средств организации дорожного движения (ТСОДД) по косвенным признакам, может не совпадать с тем, который отражает их сходство по основному критерию - уровню аварийности. Поэтому для повышения достоверности результатов требуется дополнительная верификация: на этапе проверки адекватности полученных кластеров необходимо учитывать прямые данные об аварийности и, при необходимости, вносить корректировки. Формализуем задачу кластеризации следующим образом: пусть  $S = \{s_1, \dots, s_m\}$  – множество всех возможных мест размещения технических средств организации дорожного движения на рассматриваемом участке. Каждое место  $s_i \in S_i$  характеризуется двумя показателями, косвенно влияющими на безопасность дорожного движения, такими как сложность участка автомобильной дороги  $m(s_i)$  и коэффициент загруженности этого участка  $g(s_i)$  с учетом влияния пешеходов и «точек притяжений». Сложность участка автомобильной дороги  $m(s_i)$  определяется как взвешенная сумма количества конфликтных точек различных типов:

$$m(s_i) = \sum_{j=1}^n \sigma_j * m_j(s_i) . \quad (7)$$

где  $m_j(s_i)$  – число конфликтных точек типа  $j$  на месте  $s_i$ , а  $\sigma_j$  – коэффициент сложности, отражающий степень риска, ассоциированного с данным типом конфликта.

Коэффициент загруженности участка автомобильной дороги  $g(s_i)$  с учетом влияния пешеходов и «точек притяжений» можно представить в следующем виде:

$$g(s_i) = \frac{n(s_i) \times (1 + P \times A)}{z(s_i)} \quad (8)$$

где  $n(s_i)$  – интенсивность транспортного потока,  $z(s_i)$  – пропускная способность участка,  $P$  – индекс пешеходной активности, а  $A$  – коэффициент, отражающий влияние «точек притяжения».

Схожесть возможных мест размещения  $s_i$  и  $s_j$  по косвенным признакам определяется расстоянием между их значениями, которое рассчитывается с помощью формулы:

$$\delta(s_i, s_j) = \sqrt{\xi(m(s_i) - m(s_j))^2 + \zeta(g(s_i) - g(s_j))^2}, \quad (9)$$

где  $\xi$  – представляет собой коэффициент важности сложности участка автомобильной дороги, а  $\zeta$  – подразумевает под собой коэффициент важности загруженности участка автомобильной дороги. Эти коэффициенты удовлетворяют условиям  $\xi + \zeta = 1$ ,  $\xi \geq 0$ ,  $\zeta \geq 0$ , что означает, что они представляют собой нормированные веса, которые можно определить с помощью экспертной оценки, в том числе с помощью метода Саати.

Алгоритм группировки разрабатывается на основе модифицированного алгоритма ФорЭл [17-19], адаптированного к решаемой задаче. В рамках группировки вводятся следующие обозначения:  $S^k$  – множество возможных мест размещения ТСОДД, которые еще не были объединены в группы;  $\bar{S}^k$  – множество уже сгруппированных возможных мест размещения ТСОДД. Следует отметить, что  $S = S^k \cup \bar{S}^k$ ,  $S^k \cap \bar{S}^k = \emptyset$ . Кластеризация завершается, когда все возможные места размещения ТСОДД будут сгруппированы, что эквивалентно условию  $S = S^k$ ,  $\bar{S}^k = \emptyset$ . До начала группировки данных экспертом определяется начальная величина радиуса кластера  $r$  для  $S_1^k$  и инициализирует счетчик  $i$ , равный 1. Алгоритм группировки данных включает в себя следующие шаги:

1. Выбирается случайное место размещения ТСОДД  $s_h \in \bar{S}^k$  и формируется множество  $S_i$ , содержащее все ранее некластеризованные возможные места размещения ТСОДД, попадающие в окружность с центром  $o_i = s_h$  и радиусом  $r$ .

2. Центр  $o_i$  смещается в центр масс множества  $S_i$ , который вычисляется как:

$$o_i = \left( \frac{\sum_{s_j \in S_i} m(s_j)}{S_i}, \frac{\sum_{s_j \in S_i} g(s_j)}{S_i} \right)$$

3. Шаг 2 повторяется до тех пор, пока состав объектов в множестве  $S_i$  не достигнет стабильности.

4. Множество  $S_i$  признается новым кластером  $S_i^k$ , при этом все его элементы считаются кластеризованными. Если  $\bar{S}^k$  не является пустым ( $\bar{S}^k \neq \emptyset$ ), то счетчик  $i$  увеличивается на 1 ( $i = i + 1$ ) и алгоритм возвращается к шагу 1.

Алгоритм кластеризации достигает второй стадии завершения, когда все объекты успешно распределяются по соответствующим группам, что свидетельствует о пустоте множества неотнесенных объектов ( $\bar{S}^k = \emptyset$ ). На этом этапе формируются начальные параметры и определяется исходный состав кластеров. Далее алгоритм переходит к стадии их уточнения, на которой проводится оценка адекватности сформированных кластеров на основе косвенных признаков. Если экспертный анализ показывает, что количество полученных кластеров является недостаточным или избыточным для отражения структуры данных, то заданный радиус  $r$  корректируется, и алгоритм возвращается ко второй стадии. Затем, для каждой пары кластеров определяется расстояние между их центрами  $\delta(o_i, o_j)$ . В случае, если это расстояние оказывается меньше двойного радиуса кластера ( $\delta(o_i, o_j) < 2r$ ), то объекты кластеров  $S_i^k$  и  $S_j^k$  перераспределяются в соответствии с формулой 9, чтобы они были отнесены к тому кластеру, центр которого ближе к объекту. Третья стадия кластеризации служит механизмом уточнения и корректировки результатов, полученных на предыдущих этапах. Она обеспечивает более точное распределение объектов по кластерам с учётом значений косвенных индикаторов безопасности. Благодаря этой итеративной процедуре достигается повышение корректности и интерпретируемости итоговой кластерной структуры. В ходе оценки результатов кластеризации технических средств организации дорожного движения, основное внимание уделяется формированию групп мест размещения на основе

показателя аварийности. Однако, учитывая косвенный характер признаков, используемых для кластеризации, существует риск объединения мест с существенно отличающимися уровнями в один кластер. Для преодоления риска, на этапе проверки адекватности результатов кластеризации проводится их корректировка с учётом прямого индикатора уровня безопасности дорожного движения. Это позволяет уточнить состав кластеров и обеспечить более обоснованное распределение мест размещения технических средств организации дорожного движения (ТСОДД). Для оценки сходства объектов по основному признаку – уровню аварийности – применяется метод анализа иерархий Саати, который позволяет проводить парные сравнения до 10 элементов. В рамках вычислительного эксперимента формируется матрица  $A = (a_{it})_{i,t=1,\dots,m}$ , построенная в соответствии с принципами данного метода, что позволяет оценить и сравнить объекты по основному признаку. В результате кластеризации выделяются подмножества контрастных объектов  $\tilde{S}_i$ , входящих в кластер  $S_i^k \subset S$  и демонстрирующих наибольшую разницу по косвенным признакам. Чтобы сравнить анализируемые объекты, учитывая ограничения метода Саати, были определены девять точек с координатами  $m_i^{min} + \frac{m_i^{max} - m_i^{min}}{4} * l, g_i^{min} + \frac{g_i^{max} - g_i^{min}}{4} * u$ , где  $m_i^{min} = \min\{m(s_j), s_j \in S_i^k\}$ ;  $m_i^{max} = \max\{m(s_j), s_j \in S_i^k\}$ ;  $g_i^{min} = \min\{g(s_j), s_j \in S_i^k\}$ ;  $g_i^{max} = \max\{g(s_j), s_j \in S_i^k\}$ ;  $l, u \in \{1,2,3\}$ , то есть, эти координаты были получены путем вычисления минимальных и максимальных значений  $m$  и  $g$  для объектов в кластере  $S_i^k$ . Затем были выбраны контрастные точки, равномерно распределенные по прямоугольной области, которая описывает границы кластера. Это позволило обеспечить полное представление характеристик кластера. Кластер  $S_i^k$  включает объекты, расположенные вблизи контрастных точек, и для каждого из них проводится сравнительный анализ показателя аварийности с помощью метода Саати. Степень схожести объектов в кластере  $S_i^k$ , связанная с уровнем безопасности дорожного движения, характеризуется разницей между максимальной и минимальной оценками объектов в кластере:

$$\rho(S_i^k) = \max\{h(s_j), s_j \in S_i^k\} - \min\{h(s_j), s_j \in S_i^k\}, \quad (10)$$

где  $h(s_j)$  – оценка для объекта  $s_j$ , полученная с помощью метода Саати. Стоит отметить, что оценки нормированы, то есть  $\sum_{s_j \in S_i^k} h(s_j) = 1$ , что, в свою очередь, обеспечивает сравнимость результатов для всех кластеров.

Уровень аварийности каждого контрастного объекта в кластере  $S_i^k$  оценивается на основе сравнительного анализа. Поскольку результаты, получаемые методом Саати, чувствительны к количеству сравниваемых элементов, в рамках исследования ограничиваются девятью наиболее репрезентативными объектами в каждом кластере, что соответствует рекомендованному пределу применимости метода. Для проведения экспертной оценки формируется матрица попарных сравнений  $A = (a_{it})_{i,t=1,\dots,9}$ , состоящая из элементов  $a_{it}$ , где  $i$  и  $t$  варьируются от 1 до 9:

$$a_{it} = \begin{cases} 1, s_i \text{ и } s_j \text{ имеют равные оценки} \\ 3, \text{ оценка на } s_i \text{ незначительно превышает оценку на } s_j \\ 5, \text{ оценка на } s_i \text{ значительно превышает оценку на } s_j \\ 7, \text{ оценка на } s_i \text{ явно превышает оценку на } s_j \\ 9, \text{ оценка на } s_i \text{ абсолютно превосходит оценку на } s_j \end{cases}$$

Кроме того,  $a_{ti} = (a_{it})^{-1}$ . В случае отсутствия статистической информации о применении технических средств организации дорожного движения с целью обеспечения и повышения безопасности дорожного движения на  $s_j \in S_i^k$ , по умолчанию  $\gamma(f_j, S_i^k) = 0$ . В противном случае находится среднее значение уровня безопасности дорожного движения по следующей формуле:

$$\overline{\gamma(f_j, S_i^k)} = \frac{\sum_{s_j \in S_i^k} \gamma(f_j, s_j)}{\sum_{s_j \in S_i^k} \text{sign}(\gamma(f_j, s_j))}. \quad (11)$$

Разброс значений оценки  $\gamma(f_j, S_i^k)$  можно охарактеризовать средним квадратичным отклонением: 
$$\sigma(\gamma(f_j, S_i^k)) = \sqrt{\frac{\sum_{s_j \in S_i^k} (\gamma(f_j, s_j))^2}{\sum_{s_j \in S_i^k} \text{sign}(\gamma(f_j, s_j))} - (\overline{\gamma(f_j, S_i^k)})^2}. \quad (12)$$

При превышении допустимого уровня значения  $\sigma(\gamma(f_j, S_i^k))$ , указывающего на значительную вариабельность влияния  $\gamma(f_j, S_i^k)$  на риск аварийности, рекомендуется повторно провести группировку объектов с уменьшенным радиусом кластеризации  $r$  для достижения более точного результата. Определение значений  $\gamma(f_j, S_i^k)$  с целью обеспечения и повышения безопасности дорожного движения с помощью технических средств организации дорожного движения позволил провести экстраполяцию уже известных оценок уровня безопасности дорожного движения и влияния объектов одного кластера на объекты того же кластера, которые не имеют пока подобных оценок.

**Вывод.** Модель оценки тяжести последствий дорожно-транспортных происшествий, разработанная на основе метода анализа иерархий Саати, обеспечивает всестороннюю оценку ущерба, связанного с разными типами дорожно-транспортных происшествий, учитывая их различные последствия. Это позволяет учитывать сложные взаимосвязи между типами дорожно-транспортных происшествий и их последствиями, что является важным шагом в направлении создания более точной и объективной системы оценки риска на автомобильных дорогах. Предложен алгоритм группировки возможных мест размещения технических средств организации дорожного движения на основе выявленных показателей, влияющих на безопасность дорожного движения. Данный алгоритм может частично компенсировать недостаток статистических данных, связанных с уровнем безопасности дорожного движения, и повысить обоснованность оценки изменения уровня безопасности дорожного движения при установке технических средств организации дорожного движения [21].

#### Библиографический список:

1. Руководство по прогнозированию интенсивности движения на автомобильных дорогах. М.: Информавтодор, 2003. – 87 с.
2. Справочник по безопасности дорожного движения. – М.: Росавтодор, 2010. – 384 с.
3. Сильянов В.В., Домке Э.Р. Транспортно-эксплуатационные качества автомобильных дорог и городских улиц: учебник для студ. высш. учеб. заведений. 2-е изд. М.: Академия, 2008. – 352 с.
4. Руководство по оценке пропускной способности автомобильных дорог / Министерство автомобильных дорог. – М.: Транспорт, 1982. – 90 с.
5. Рекомендации по обеспечению безопасности движения на автомобильных дорогах. Росавтодор. – М.: Транспорт, 2002 – 115 с.
6. Daganzo Carlos F. Fundamentals of Transportation and Traffic Operations. Oxford; New York: Pergamon, 1997: 339 p.
7. Schnabel W., D.Lohse. Din.Kirschbaum, Beuth Grundlagen der Strassen-verkehrstechnik und der Verkehrsplanung. dritte volstaendig ueberarbeitete Auflage. Berlin, Wien, Zuerich, 2011.B1619p,B2. 632p.
8. Клишковштейн, Г.И. Организация дорожного движения: учеб. для вузов / Г.И. Клишковштейн, М.Б. Афанасьев. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 2001 – 247 с.
9. Бешелев, С.Д. Экспертные оценки / С.Д. Бешелев, Ф.Г. Гурвич. – М.: Наука, 1973. – 161 с.
10. Методика оценки и расчета нормативов социально-экономического ущерба от дорожно-транспортных происшествий: методические рекомендации (Р-03112199-0502-00). – М.: Трансконсалтинг, 2001. – 62 с.
11. Девятков, В.В. Системы искусственного интеллекта: учебное пособие для вузов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 352 с.
12. Саати, Т.Л. Об измерении неосознаваемого. Подход к относительным измерениям на основе главного собственного вектора матрицы парных сравнений// *Cloud Of Science*. – 2015. – Т. 2. – № 1. – С. 5–39.
13. Саати, Т.Л. Принятие решений: метод анализа иерархий: пер. с англ. М.: Радио и связь, 1993. – 278 с.
14. Соколов, Н.П. Введение в теорию многомерных матриц. – Киев: Наукова думка, 1972. – 17 с.
15. Дюран, Б. Кластерный анализ / Б. Дюран, П. Оделл; пер. с англ. Е.З.Демиденко; под ред. и с предисл. А.Я. Боярского. – М.: Статистика, 1977. – 128 с.
16. Бухарин, С.В. Кластерно-иерархические методы экспертизы экономических объектов: монография / С.В. Бухарин, А.В. Мельников. – Воронеж: Научная книга, 2012. – 276 с.
17. Гайдышев, И. П. Анализ и обработка данных / И.П. Гайдышев. – СПб.: Питер, 2001. – 750 с.

18. Загоруйко Н.Г. Прикладные методы анализа данных и знаний. Новосибирск: ИМ СОРАН, 1999. 270.
19. Кулаичев, А.П. Методы и средства комплексного анализа данных. – М.: Форум, 2011. – 512 с.
20. Мельников А.В. Кластерно-иерархические методы экспертизы технических и экономических объектов: автореф. дис. д-ра техн. наук: 05.13.18 / Мельников А.В. Воронеж, 2015. – 32 с.
21. Арутюнян, М.А. Численный метод решения задачи рационального размещения технических средств организации дорожного движения. Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2024;12(3). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1556> DOI: 10.26102/2310-6018/2024.46.3.021

#### References:

1. Guide to Forecasting Traffic Intensity on Highways. Moscow: Informavtodor, 2003; 87. (In Russ)
2. Handbook of Road Safety. Moscow: Rosavtodor, 2010;384. (In Russ)
3. Silyanov V.V., E.R. Domke. Transport and Operational Qualities of Highways and City Streets: Textbook for Students of Higher Educational Institutions. 2nd ed. Moscow: Academy, 2008; 352. (In Russ)
4. Guidelines for assessing the capacity of highways. Ministry of Highways. M.:Transport, 1982; 90. (In Russ)
5. Recommendations for ensuring traffic safety on highways. Rosavtodor. M.: Transport, 2002; 115. (In Russ)
6. Daganzo, Carlos F. Fundamentals of Transportation and Traffic Operations / Carlos F. Daganzo. – Oxford; New York: Pergamon, 1997;339.
7. Schnabel W., D.Lohse. Din. Kirschaum, Beuth. Grundlagen der Strassen-verkehrstechnik und der Verkehrsplanung. dritte volstaendig ueberarbeitete Auflage. Berlin, Wien, Zuerich, 2011;1:619., 2:632.
8. Klinkstein, G.I. Traffic management: textbook for higher education institutions./G.I. Klinkstein, M.B. Afanasyev. – 5th ed., revised and enlarged. – M.: Transport, 2001; 247. (In Russ)
9. Beshelev, S.D. Expert assessments / S.D. Beshelev, F.G. Gurvich. - M.: Nauka, 1973;161. (In Russ)
10. Methodology for assessing and calculating standards for socio-economic damage from road accidents: methodological recommendations (R-03112199-0502-00). - M.: Transconsulting, 2001; 62. (In Russ)
11. Devyatkov, V.V. Artificial Intelligence Systems: A Textbook for Universities / V.V. Devyatkov. – M.: Publishing House of Bauman Moscow State Technical University, 2001;352. (In Russ)
12. Saati, T.L. On Measuring the Intangible. An Approach to Relative Measurements Based on the Principal Eigenvector of a Pairwise Comparison Matrix. *Cloud Of Science*. 2015; 2(1):5-39 (In Russ)
13. Saati, T.L. Decision Making: The Analytic Hierarchy Process: trans. from English / T. Saati. – M.: Radio and Communications, 1993;278. (In Russ)
14. Sokolov, N.P. Introduction to the Theory of Multidimensional Matrices. – Kyiv:Naukova Dumka, 1972;17.
15. Durand, B. Cluster Analysis / B. Durand, P. Odell; trans. from English by E.Z.Demidenko; edited and with a foreword by A.Ya. Boyarsky. – Moscow: Statistika, 1977; 128. (In Russ)
16. Bukharin, S.V. Cluster-Hierarchical Methods of Expertise of Economic Objects: monograph / S.V. Bukharin, A.V. Melnikov. – Voronezh: Nauchnaya Kniga, 2012;276. (In Russ)
17. Gaidyshev, I. P. Analysis and processing of data. St. Petersburg: Piter, 2001;750. (In Russ)
18. Zagoruiko N.G. Applied methods of data and knowledge analysis. Novosibirsk:IMSBRAS, 1999;270.
19. Kulaichev, A. P. Methods and means of complex data analysis. Moscow: Forum, 2011;512. (In Russ)
20. Melnikov A.V. Cluster-hierarchical methods of examination of technical and economic objects: author's abstract. dis. Dr. of Technical Sci.: 05.13.18. Melnikov A.VI. Voronezh, 2015;32. (In Russ)
21. Arutyunyan, M.A. Numerical method for solving the problem of rational location of technical means of traffic management. Modeling, Optimization and Information Technology. 2024;12(3). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1556> DOI: 10.26102/2310-6018/2024.46.3.021 (In Russ)

#### Сведения об авторе:

Арутюнян Мелания Андраниковна, старший преподаватель кафедры математического моделирования и прикладной информатики; [melanya.arutyunyan@yandex.ru](mailto:melanya.arutyunyan@yandex.ru); ORCID 0000-0001-7395-9069

#### Information about the author:

Melania A. Arutyunian, Senior Lecturer Department of Mathematical Modeling and Applied Informatics; [melanya.arutyunyan@yandex.ru](mailto:melanya.arutyunyan@yandex.ru); ORCID 0000-0001-7395-9069

#### Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 10.06.2025.

Одобрена после рецензирования/ Revided 30.08.2025.

Принята в печать/Accepted for publication 30.10.2025.

## Оптимизация структуры ИСПДн объектов КИИ на основе теории рисков

Э.В. Бирих, И.И. Фадеев, Е.Н. Николаев, Д.В. Сахаров, П.А. Лужников

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций

имени профессора М.А. Бонч-Бруевича,

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

**Резюме. Цель.** Целью исследования является снижение актуальных рисков ИБ важных активов на основе анализа и систематизации значимых недостатков, выявленных в результате аудита ИБ ИСПДн в двадцати организациях КИИ. **Метод.** Обобщение и анализ результатов контрольно-надзорной деятельности ИСПДн объектов КИИ, выявление наиболее опасных угроз на основе теории рисков. **Результат.** Выявлены опасные угрозы ИБ объектов КИИ, предложены решения по усилению защищенности ИСПДн путем изменения топологии, повышения защищенности сервера с ПДн за счет сегментации сети, многоуровневой фильтрации трафика и комплексного мониторинга. Проведен расчет эффективности предложенных мер. **Вывод.** Выявлены опасные типовые угрозы ИБ объектов КИИ, предложены решения по усилению защищенности в информационных системах персональных данных.

**Ключевые слова:** информационная система персональных данных, объекты критической информационной инфраструктуры, защита информации, модель угроз, модель нарушителя, информационная безопасность, теория рисков, сетевая инфраструктура

**Для цитирования:** Э.В. Бирих, И.И. Фадеев, Е.Н. Николаев, Д.В. Сахаров, П.А. Лужников. Оптимизация структуры ИСПДн объектов КИИ на основе теории рисков. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025;52(4):49-62. DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-4-49-62.

## Optimization of the structure of the information system of personal data of critical information infrastructure objects based on risk theory

E.V. Birikh, I.I. Fadeev, E.N. Nikolaev, D.V. Sakharov, P.A. Luzhnikov

M.A. Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications,  
22 Bolshevnikov Ave., build. 1, St Petersburg 193232, Russia

**Abstract. Objective.** The purpose of the study is to reduce the actual risks of information security of important assets based on the analysis and systematization of significant deficiencies identified as a result of the ISPDn information security audit in twenty CII organizations. **Method.** Generalization and analysis of the results of the control and supervisory activities of ISPs of CII facilities, identification of the most dangerous threats based on risk theory. **Result.** Dangerous threats to the information security of CII facilities have been identified, and solutions have been proposed to enhance the security of ISPs by changing the topology, increasing the security of the server with PD through network segmentation, multi-level traffic filtering and integrated monitoring. The effectiveness of the proposed measures has been calculated. **Conclusion.** Dangerous typical threats to the information security of CII facilities have been identified, and solutions have been proposed to enhance security in personal data information systems.

**Keywords:** personal data information system, critical objects, information protection, threat model, intruder model, information security, risk theory, network infrastructure

**For citation:** E.V. Birikh, I.I. Fadeev, E.N. Nikolaev, D.V. Sakharov, P.A. Luzhnikov. Optimization of the structure of the information system of personal data of critical information infrastructure objects based on risk theory. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2025; 52(4):49-62. (In Russ) DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-4-49-62.

**Введение.** В современном цифровом обществе защита персональных данных (ПДн) является одной из важнейших задач как для государственных, так и для частных организаций. Указанная категория информации обрабатывается в информационных системах персональных данных (ИСПДн) [1-7]. Основным компонентом обеспечения безопасности ПДн является правильно спроектированная и защищённая сетевая инфраструктура, которая позволяет контролировать потоки данных и предотвращать несанкционированный доступ к информации [8-13]. Не случайно законодатель ввел новые нормы в статью 272 УК РФ и усилил уголовную ответственность за незаконное использование и передачу персональных данных. Изменения вступили в силу 11 декабря 2024 года [14].

Нормативно-правовая база, регламентирующая защиту ПДн в РФ, включает в себя ряд ключевых документов, таких как приказы ФСТЭК России № 21 от 18 февраля 2013 года и № 31 от 14 марта 2014 года [15, 16] в дополнение к приказу № 239 от 25 декабря 2017 г. Эти нормативные документы устанавливают требования к защите информации в ИСПДн и определяют основные меры, которые должны быть реализованы для обеспечения защиты данных, а также могут применяться на незначимых объектах КИИ.

Несмотря на обязательность исполнения требований указанных приказов ФСТЭК России, при проведении контрольных мероприятий федеральными органами исполнительной власти на объектах КИИ регулярно фиксируются многочисленные нарушения в области защиты ИСПДн, в типовой структуре которых присутствуют различные уровни сетевого взаимодействия, включающие сегменты обработки, хранения и передачи персональных данных, а также элементы контроля и защиты доступа. Выявляемые нарушения указывают на недостатки в реализации защитных мер, которые, хотя и прописаны в нормативной документации, часто остаются недостаточно реализованными на практике. Систематическое выявление таких нарушений подчёркивает необходимость совершенствования на предприятиях технических и организационных мер защиты, а также проведение регулярного контроля за соблюдением требований нормативных актов в сфере ИБ.

**Постановка задачи.** Задачей исследования является проведение анализа типовых нарушений безопасности, выявленных в ходе контрольно-надзорных мероприятий в двадцати организациях КИИ, и разработка подхода к повышению безопасности типовой инфраструктуры ИСПДн на основе оценки рисков.

**Методы исследования.** В работе использованы методы обобщения и анализа данных аудитов информационной безопасности ИСПДн, теория рисков на основе стандарта NIST SP 800-30 с использованием смешанного качественно-количественного подхода к оценке вероятности угроз, сочетающего экспертные оценки и статистические данные из отчетов Kaspersky [17-22]. Проведен расчет коэффициента эффективности защитных мер путем сравнения количества угроз до и после внедрения мер защиты. Выполнено моделирование защищенной сетевой топологии с учетом требований сегментации и многоуровневой фильтрации трафика. Осуществлен сравнительный анализ снижения рисков после внедрения предложенных защитных мер.

**Обсуждение результатов.** Аудит безопасности показывает, что многие компании сталкиваются с трудностями уже на этапе практической реализации требований к защите сетевой инфраструктуры [23-28]. Топология структуры типовой ИСПДн представлена на рис. 1.

Уровень сетевой инфраструктуры в контексте ИБ относится к физическим и логическим компонентам, которые составляют сеть для передачи данных. Это включает в себя все элементы, обеспечивающие коммуникацию и функционирование сети, такие как маршрутизаторы, коммутаторы, серверы, каналы связи, протоколы передачи данных и устройства защиты информации [29-35].



Рис. 1 – Топология типовой ИСПДн

Fig. 1 – Topology of a typical personal data information system

На основе анализа аудита ИБ ИСПДн выявлены нарушения защиты информации на уровне сетевой инфраструктуры, приведенные в табл. 1.

Таблица 1. Типовые нарушения в ИСПДн на сетевом уровне  
 Table 1. Typical violations in the ISPДн at the network level

| № | Тип нарушения Violation Type   | Описание нарушения Violation Description   |
|---|--|--|
| 1 | Отсутствие сегментации сети<br>Lack of network segmentation                                      | Не используется логическая или физическая сегментация сети для разделения зон с разным уровнем защиты.<br>No logical or physical network segmentation is used to separate zones with different levels of protection.                                   |
| 2 | Недостаточные меры по мониторингу сетевой активности<br>Insufficient network activity monitoring | Отсутствие систем для анализа и мониторинга сетевых пакетов и подозрительной активности внутри сети.<br>Lack of systems for analyzing and monitoring network packets and suspicious activity within the network.                                       |
| 3 | Недостаточная защита от DDoS-атак<br>Insufficient protection against DDoS attacks                | Не реализованы механизмы защиты от распределённых атак на отказ в обслуживании, что увеличивает риск перегрузки сети.<br>Distributed denial-of-service attack protection mechanisms are not implemented, which increases the risk of network overload. |
| 4 | Использование устаревших версий программного обеспечения<br>Using outdated software versions     | На некоторых узлах сети используются уязвимые версии ПО, что открывает потенциальные дыры в защите.<br>Some network nodes are running vulnerable versions of software, which opens potential security holes.   |

Данные нарушения существенно снижают конфиденциальность, целостность, доступность ПДн и могут привести к утечке, несанкционированному доступу или блокировке конфиденциальной информации. Рассмотрим их подробнее:

1. Отсутствие сегментации сети – это нарушение, при котором не проводится разделение сети на логические или физические сегменты. Такое разделение позволяет ограничить доступ к разным зонам сети на основе уровня их критичности и степени конфиденциальности данных. Например, персонал, работающий с некритическими ресурсами, не должен иметь доступ к базам данных с персональной информацией. Без сегментации нарушитель, получивший доступ к одной части сети, может легко проникнуть в другие её зоны, включая те, которые содержат критически важные данные.

2. Недостаточные меры по мониторингу сетевой активности означают, что в организации либо отсутствуют, либо слабо настроены системы мониторинга и анализа сетевых пакетов. Это затрудняет своевременное обнаружение подозрительной активности, такой как несанкционированные подключения или сканирование портов. Без регулярного мониторинга сетевой активности администраторы могут не заметить кибератаку или внутреннюю утечку данных.

3. Недостаточная защита от DDoS-атак – это распространённое нарушение, которое связано с отсутствием механизмов противодействия распределённым атакам на отказ в обслуживании. В случае успешной атаки сеть может быть перегружена искусственно созданным трафиком, что приведёт к её недоступности для легитимных пользователей, а также увеличит уязвимость перед дальнейшими атаками, пока сеть отключена.

4. Использование устаревших версий программного обеспечения на сетевых узлах и устройствах создаёт серьёзные уязвимости, поскольку такие версии ПО могут содержать известные уязвимости, для которых уже выпущены обновления. Нарушители могут использовать эти уязвимости для проникновения в сеть, захвата контроля над сетевыми ресурсами или внедрения вредоносного кода. Для минимизации этих рисков организациям рекомендуется предпринять конкретные шаги, направленные на модернизацию сетевой инфраструктуры и оптимизацию процессов защиты данных [33-36]. Эти меры должны быть

реализованы в соответствии с требованиями, установленными законодательством, и передовыми практиками в области информационной безопасности. В табл. 2, были приведены рекомендации, которые помогут устранить наиболее распространённые нарушения.

**Таблица 2. Рекомендации по устранению наиболее частых нарушений**  
**Table 2. Recommendations for eliminating the most common violations**

| № | Тип нарушения<br>Violation Type  | Рекомендации по устранению<br>Recommendations for elimination   |
|---|--|---|
| 1 | Отсутствие сегментации сети<br>Lack of network segmentation                                      | Внедрить сегментацию сети с помощью VLAN, разделяя сетевые зоны на основе чувствительности данных. Implement network segmentation using VLANs, separating network zones based on data sensitivity.  |
| 2 | Недостаточные меры по мониторингу сетевой активности<br>Insufficient network activity monitoring | Внедрить системы обнаружения и предотвращения вторжений (IDS/IPS) и настроить регулярный мониторинг сетевой активности. Implement intrusion detection and prevention systems (IDS/IPS) and set up regular monitoring of network activity. |
| 3 | Недостаточная защита от DDoS-атак<br>Insufficient protection against DDoS attacks                | Установить системы фильтрации трафика и использования CDN для распределения нагрузки, настроить защиту от DDoS. Install traffic filtering systems and use CDN for load distribution, configure DDoS protection.                           |
| 4 | Использование устаревших версий программного обеспечения<br>Using outdated software versions     | Настроить регулярное обновление программного обеспечения и внедрить систему управления патчами (patch management). Set up regular software updates and implement a patch management system.   |

В современной цифровой среде информационные системы организаций постоянно подвергаются различным угрозам. Чтобы минимизировать возможные убытки и обеспечить защиту данных, используется теория рисков, которая позволяет оценить вероятность возникновения инцидента и его потенциальное влияние на организацию [17-18]. Согласно методике NIST 800-30, расчет коэффициента риска производится по следующей формуле:

$$R = P(t) \times S,$$

где R – значение риска, P – вероятность реализации угрозы информационной безопасности (применяется смесь качественной и количественной шкалы), S – степень влияния угрозы на актив (цена актива в качественной и количественной шкале).

Чтобы оценить вероятность P(t) с использованием смешанного подхода, разделим оценку на качественную и количественную составляющие:

1. Качественная оценка:

Будет использоваться метод анализа исторических данных. Вероятности выбираются на основе частоты возникновения угроз в прошлом, оценивая, насколько часто происходили инциденты, связанные с каждой угрозой. Оценка основана на данных отчётов, указывающих на количество инцидентов, а также на текущих тенденциях. Для качественной оценки используются следующие вероятности:

Высокая вероятность (0.7-1.0): Угроза реализовывалась часто (например, несколько инцидентов за последний год или больше 30% инцидентов связано с этой угрозой).

Средняя вероятность (0.4-0.6): Угроза реализовывалась время от времени (например, один или два инцидента за год или около 20-30%).

Низкая вероятность (0.1-0.3): Инциденты редки или незначительны (менее 20%).

2. Количественная оценка:

Количественная оценка основана на реальных данных о частоте инцидентов из отчётов. Используются данные из отчётов Kaspersky 2023 и 2024 годов. Таким образом, выполнен расчет вероятности P(t) для каждого типа нарушения:

1) Отсутствие сегментации сети:

Качественная оценка: высокая (0.7) – часто встречается в инцидентах.

Количественная оценка: согласно отчетам Kaspersky, около 30% всех атак были связаны с отсутствием сегментации. Это даёт количественную вероятность 0.3.

Итоговая вероятность P(t) – среднее арифметическое качественной и количественной оценок:

$$P(t) = (0.7 + 0.3)/2 = 0.5.$$

2) Недостаточные меры по мониторингу сетевой активности:

Качественная оценка: средняя (0.5) – инциденты редки, но возможны.

Количественная оценка: в отчётах Kaspersky указано, что около 25% инцидентов связаны с недостаточным мониторингом. Это даёт количественную вероятность 0.25.

Итоговая вероятность:  $P(t) = (0.5 + 0.25)/2 = 0.375$ .

3) Недостаточная защита от DDoS-атак:

Качественная оценка: средняя (0.5) – случаи не часты, но возможны.

Количественная оценка: в отчетах отмечается, что около 15% инцидентов связаны с DDoS-атаками. Количественная вероятность – 0.15.

Итоговая вероятность:  $P(t) = (0.5 + 0.15)/2 = 0.325$ .

4) Использование устаревших версий ПО:

Качественная оценка: высокая (0.7) – часто встречается.

Количественная оценка: согласно отчетам, около 40% атак связаны с уязвимостями в устаревшем ПО. Количественная вероятность – 0.4.

Итоговая вероятность:  $P(t) = (0.7 + 0.4)/2 = 0.55$ .

Для того, чтобы посчитать  $R$  – итоговое значение риска, требуется определить  $S$  – стоимость актива. Для оценки рисков, связанных с утечками и компрометацией ПДн, важно учитывать различные факторы, влияющие на безопасность информационных систем. Каждый из этих факторов может оказывать значительное воздействие на конфиденциальность, целостность и доступность ПДн, что в свою очередь определяет уровень риска и последствий для организации. Подход к оценке  $S$  – стоимости актива, для каждого нарушения оценивается по шкале от 1 до 3, где:

1. Минимальные последствия (например, утечка некритичных ПДн, которая не оказывает значительного влияния на операции компании или нарушает права ограниченного числа субъектов данных).
2. Мредние последствия (например, компрометация ПДн сотрудников или клиентов, что может привести к финансовым убыткам, штрафам, утрате доверия и умеренным репутационным рискам).
3. Максимальные последствия (например, утечка конфиденциальной информации клиентов, такой как финансовые данные, медицинские данные или биометрические сведения, что может повлечь за собой значительные убытки, штрафы и серьезные репутационные потери).

Расчет оценки  $S$  – ценность актива (ПДн). Отсутствие сегментации сети: если сеть не сегментирована, нарушители могут беспрепятственно перемещаться по ней, получая доступ к персональным данным, таким как данные клиентов или сотрудников. Это может привести к нарушению конфиденциальности, целостности и доступности этих данных. Последствия оцениваются как максимальные, поскольку утечка или компрометация может повлечь за собой значительные репутационные и финансовые потери  $S = 3$ .

Недостаточные меры по мониторингу сетевой активности: мониторинг сетевой активности позволяет обнаруживать подозрительные действия и предотвращать утечки ПДн на ранних этапах. Отсутствие мониторинга может привести к утечке данных, однако последствия будут умеренными, так как угроза может затронуть ограниченное количество данных или субъектов  $S = 2$ .

Недостаточная защита от DDoS-атак: DDoS-атаки могут вызвать сбой в работе сервисов, которые обрабатывают или хранят персональные данные. В результате могут быть нарушены процессы, связанные с доступом к данным, что повлечет за собой значительные убытки для организаций, особенно тех, которые зависят от постоянного доступа к данным  $S = 3$ .

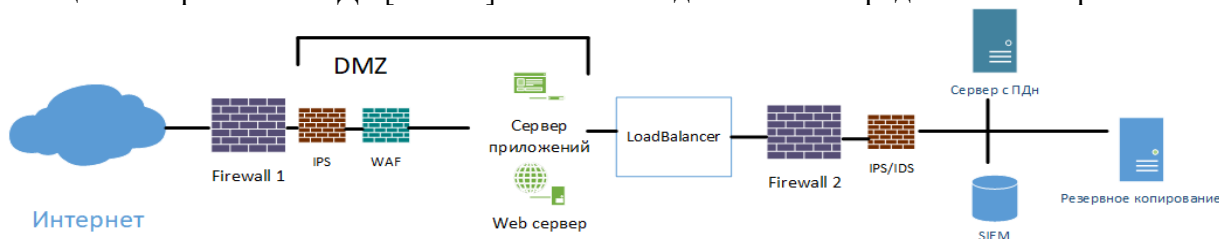
Использование устаревших версий ПО: Устаревшее программное обеспечение может содержать уязвимости, которые могут быть использованы для компрометации ПДн, таких как финансовая или медицинская информация. Это может привести к серьезным последствиям для конфиденциальности, целостности и доступности данных, создавая высокий уровень риска  $S = 3$ . На основе полученных данных составлена табл. 3, в которой

содержаться сведения по типам нарушений, качественной оценки, количественной оценки, итоговой вероятности  $P(t)$ , ценности актива  $S$ , а также итогового значения риска  $R$ .

**Таблица 3. Результаты расчетов**  
**Table 3. Calculation results**

| Тип нарушения<br>Violation Type   | Качественная оценка<br>Qualitative | Количественная оценка<br>Quantitative | Вероятность<br>$P(t)$<br>Probability | S<br>(ценность актива/<br>asset value) | R<br>(значение риска/risk<br>significance) |
|---|------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|--|--|
| Отсутствие сегментации сети/<br>Lack of network segmentation                                      | 0.7                                | 0.3                                   | 0.5                                  | 3                                      | 0.9  |
| Недостаточные меры по мониторингу сетевой активности/<br>Insufficient network activity monitoring | 0.5                                | 0.25                                  | 0.375                                | 2                                      | 0.75                                       |
| Недостаточная защита от DDoS-атак/<br>Insufficient protection against DDoS attacks                | 0.5                                | 0.15                                  | 0.325                                | 3                                      | 0.975                                      |
| Использование устаревших версий программного обеспечения/<br>Using outdated software versions     | 0.7                                | 0.4                                   | 0.55                                 | 3                                      | 1.65                                       |

Использование смешанной оценки вероятности, учитывающей как качественные, так и количественные показатели, позволяет более точно определить вероятность угроз. Наибольший риск ( $R = 1.65$ ) наблюдается при использовании устаревших версий ПО, так как их уязвимости широко используются нарушителями. Согласно полученным данным, предложена защищенная сеть, которая может быть внедрена на предприятиях, занимающихся обработкой ПДн [34 - 29]. Топология данной сети представлена на рис. 2.



**Рис. 2 – Топология защищенной сети**  
**Fig. 2 – Topology of a secure network**

Данная сеть включает несколько ключевых компонентов, каждый из которых выполняет определенные функции для защиты и обработки данных. Интернет-трафик сначала поступает на первый межсетевой экран (Firewall 1), который фильтрует входящие соединения и ограничивает доступ к демилитаризованной зоне (DMZ). В DMZ расположены веб-серверы и серверы приложений, которые обрабатывают запросы внешних пользователей. Также в DMZ размещен WAF (Web Application Firewall), который защищает веб-приложения от угроз на уровне приложений, таких как SQL-инъекции и XSS-атаки, фильтруя вредоносный HTTP-трафик.

Второй межсетевой экран (Firewall 2) изолирует внутреннюю сеть от DMZ, предоставляя дополнительный уровень безопасности. Внутренняя сеть содержит серверы с ПДн, доступ к которым контролируется более строгими правилами. Эти серверы поддерживаются системами мониторинга безопасности, такими как SIEM для анализа событий и IPS/IDS для предотвращения вторжений. Также между вторым firewall и внутренней сетью находится балансировщик нагрузки, который распределяет трафик между серверами и защищает от перегрузок.

Более подробное описание данной сети представлено в табл. 4.

**Таблица 4. Описание топологии сети**  
**Table 4. Description of network topology**

| Элемент<br>Element | Рекомендации по СЗИ<br>Recommendations for information security system  | Функциональная роль<br>Functional role   | Примеры защиты от атак<br>Examples of protection against attacks  |
|--------------------|---|--|---|
| Firewall           | InfoWatch ARMA Industrial Firewall, InfoWatch ARMA Стена, Ideco NGFW (Ideco UTM), PT NGFW, другие отечественные аналоги             | Ограничение доступа между внутренними и внешними сетями, фильтрация пакетов, защита от несанкционированного доступа.                   | -Lateral Movement (Латеральное движение) – ограничивает передвижение злоумышленника между сегментами сети.<br>-Man-in-the-Middle (MitM) – блокирует атаки путем фильтрации трафика.<br>-Privilege Escalation – фаерволы помогают предотвратить атаки с повышением привилегий.                                   |
| DMZ                | Отечественные решения для физической и логической сегментации   | Сегментация сети. DMZ размещает публичные сервисы, изолируя их от внутренней сети и предотвращая прямой доступ к критичной информации. | -Internal Reconnaissance – ограничивает доступ атакующих к внутренним системам.<br>-SQL Injection – защищает от попыток эксплуатации уязвимостей через веб-сервисы, размещенные в DMZ.<br>-WannaCry – ограничивает распространение вируса в защищенные сегменты сети.   |
| Load-Balancer      | TrafficSoft ADC, DS Proxima<br>Отечественные решения (в том числе за счёт кластеризации)  | Балансировка нагрузки между серверами, повышение доступности сервисов и защита от DDoS-атак.   | -SYN Flood – балансировщики нагрузки могут фильтровать SYN-пакеты и предотвращать перегрузку серверов.<br>-UDP Flood – ограничивают трафик для защиты от атак, направленных на исчерпание пропускной способности.<br>-Botnet Attacks – помогают распределить трафик, снижая эффект DDoS.                        |
| WAF                | PT Application Firewall, InfoWatch ARMA, UserGate WAF<br>Qrator (Cloud), MITIGATOR, ServicePipe (Cloud), Kaspersky AntiDDoS (Cloud) | Защита веб-приложений от атак на уровне HTTP(S), таких как SQL-инъекции, XSS, CSRF и другие уязвимости веб-приложений.                 | -SQL Injection – фильтрация запросов с потенциальными инъекциями.<br>-Cross-Site Scripting (XSS) – предотвращение внедрения вредоносных скриптов в страницы веб-приложений.<br>-Cross-Site Request Forgery (CSRF) – защита от подделки запросов.  |
| IPS/IDS            | В составе имеющихся отечественных средств типа Континент 4, ViPNet IDS 3, ViPNet IDS HS   | Обнаружение и предотвращение вторжений, мониторинг сетевой активности, выявление аномального поведения в трафике.                      | -Brute Force Attack – мониторинг и предотвращение попыток перебора паролей.<br>-Denial-of-Service (DoS) – обнаружение и блокировка атак на сетевые ресурсы.<br>-Exploitation of Zero-Day Vulnerabilities – выявление и предотвращение атак на уязвимости, не имеющие патчей.                                    |
| SIEM               | PT MaxPatrol SIEM, RuSIEM, KUMA, R-Vision SIEM, KOMRAD  | Централизованный сбор и анализ данных о событиях безопасности, мониторинг сетевой активности и системы обнаружения угроз.              | -Port Scanning – анализирует журналы и оповещает о сканировании портов.<br>-Brute Force Attack – мониторит попытки массового перебора паролей.<br>-DNS Spoofing – выявление аномальных изменений в DNS-записях, что может свидетельствовать о атаке.  |
| Сервер с ПДн       | Контроль баз данных с решениями продуктов классов DAM/DBF (Гарда БД)  | Хранение ПДн и их защита от утечек и несанкционированного доступа.   | -Ransomware – защита от программ-вымогателей, использующих уязвимости в старых версиях ПО для шифрования данных.<br>-Buffer Overflow – предотвращение выполнения вредоносного кода через переполнение буфера.<br>-SQL Injection – защита от инъекций в базы данных.   |
| Backup Systems     | Кибер Бэкап, RuBackup, ROC Backup   | Регулярное создание резервных копий данных, обеспечение восстановления данных при сбоях или атаках.                                    | -Ransomware – защита от потери данных в случае атаки программами-вымогателями, путем регулярного создания резервных копий.<br>-Buffer Overflow – резервные копии помогут восстановить данные, если были повреждены из-за уязвимости в приложении.<br>-WannaCry – восстановление данных после заражения вирусом. |

При выборе СЗИ следует опираться на отечественные сертифицированные решения. Для углубленного анализа состояния защищённости ИСПДн объектов КИИ произведена систематизация выявленных в ходе аудита типов нарушений и соответствующих угроз безопасности. В рамках исследования осуществлён сбор данных о зарегистрированных угрозах, произведена оценка их количества за год по четырём основным типам выявленных нарушений. В табл. 5 определено количество угроз, зафиксированных в организациях без наличия защиты от соответствующих типов нарушений.

**Таблица 5. Организации без защиты от соответствующих типов нарушений**  
**Table 5. Organizations without protection against the corresponding types of violations**

| Тип нарушения<br>Violation Type   | Количество организаций без защиты<br>Number of organizations without protection | Количество угроз<br>Number of threats |
|---|---|---------------------------------------|
| Отсутствие сегментации сети/ Lack of network segmentation   | 2   | 54                                    |
| Недостаточные меры по мониторингу сетевой активности/<br>Insufficient network activity monitoring | 3   | 33                                    |
| Недостаточная защита от DDoS-атак/ Insufficient protection against DDoS attacks                   | 1   | 25                                    |
| Использование устаревших версий программного обеспечения/<br>Using outdated software versions     | 4   | 14                                    |

В табл. 6 представлены данные об организациях, использующих меры защиты, а также количество зарегистрированных угроз.

**Таблица 6. Организации с применением средств защиты**  
**Table 6. Organizations using protective equipment**

| Тип нарушения<br>Violation Type   | Количество организаций с защитой<br>Number of organizations with protection | Используемые средства защиты<br>Protective equipment used | Количество угроз<br>Number of threats |
|---|---|---|---------------------------------------|
| Отсутствие сегментации сети/ Lack of network segmentation   | 2   | Firewall  | 10                                    |
| Недостаточные меры по мониторингу сетевой активности/<br>Insufficient network activity monitoring | 3   | IPS/IDS   | 8                                     |
| Недостаточная защита от DDoS-атак/ Insufficient protection against DDoS attacks                   | 1   | LoadBalancer  | 5                                     |
| Использование устаревших версий программного обеспечения/<br>Using outdated software versions     | 4   | Backup Systems  | 8                                     |

Для оценки эффективности применяемых мер защиты информационной безопасности в сети было решено рассмотреть изменения риска, связанного с выявленными нарушениями, до и после внедрения соответствующих защитных механизмов. Методология расчета основана на сочетании количественного анализа угроз и применения коэффициента эффективности мер защиты. Для этого использовался стандарт NIST 800-30.

Такой подход позволяет четко формализовать понятие риска и облегчает проведение дальнейших расчетов, учитывая изменения вероятности реализации угрозы после внедрения мер защиты. Для оценки влияния внедренных мер защиты на вероятность  $P$ , был введен коэффициент эффективности защитных мер  $K_{эфф}$ . Этот коэффициент характеризует степень снижения количества угроз в результате использования различных защитных механизмов. Такой подход позволяет количественно оценить эффективность защиты для каждого типа нарушений. Расчет коэффициента эффективности для каждого нарушения производится по следующей формуле:

$$K_{эфф} = \frac{U_{бз} - U_{сз}}{U_{бз}},$$

где  $K_{эфф}$  – коэффициент эффективности,  $U_{бз}$  – количество угроз до внедрения защиты,  $U_{сз}$  – количество угроз после внедрения защиты.

Произведен расчет показателей коэффициента для каждого типа нарушений:

- 1) Отсутствие сегментации сети:

$$K_{\text{эфф}} = \frac{54 - 10}{54} = \frac{44}{54} = 0.815$$

- 2) Недостаточные меры по мониторингу сетевой активности:

$$K_{\text{эфф}} = \frac{33 - 8}{33} = \frac{25}{33} = 0.758$$

- 3) Недостаточная защита от DDoS-атак:

$$K_{\text{эфф}} = \frac{25 - 5}{25} = \frac{20}{25} = 0.8$$

- 4) Использование устаревших версий ПО:

$$K_{\text{эфф}} = \frac{14 - 8}{14} = \frac{6}{14} = 0.429$$

Для учета влияния мер защиты вероятность реализации угрозы  $P$  была пересчитана на основе коэффициента эффективности. Это позволило перейти от исходной вероятности  $P_{\text{стар}}$  к скорректированной вероятности  $P_{\text{нов}}$ . Такой подход позволяет учитывать не только статистические данные, но и влияние защитных мер, что важно при анализе сетей с различными уровнями защиты. После внедрения мер защиты новая вероятность угрозы  $P_{\text{нов}}$  определяется как:

$$P_{\text{нов}} = P_{\text{стар}} \times (1 - K_{\text{эфф}}),$$

где  $P_{\text{нов}}$  – вероятность после внедрения средства защиты,  $P_{\text{стар}}$  – исходная вероятность до внедрения защиты,  $K_{\text{эфф}}$  – коэффициент эффективности защиты.

Расчет снижения вероятности по каждому типу нарушений:

- 1) Отсутствие сегментации сети:

$$P_{\text{нов}} = 0.5 \times (1 - 0.815) = 0.0925$$

- 2) Недостаточные меры по мониторингу сетевой активности:

$$P_{\text{нов}} = 0.375 \times (1 - 0.758) = 0.09075$$

- 3) Недостаточная защита от DDoS-атак:

$$P_{\text{нов}} = 0.325 \times (1 - 0.8) = 0.065$$

- 4) Использование устаревших версий ПО:

$$P_{\text{нов}} = 0.55 \times (1 - 0.429) = 0.31405$$

После пересчета вероятности  $P_{\text{нов}}$  был выполнен расчет нового уровня риска  $R_{\text{нов}}$  с учетом изменений вероятности реализации угрозы. Такой шаг позволил сравнить исходный уровень риска с уровнем после внедрения защитных мер. Кроме того, данный расчет помогает количественно оценить, насколько эффективно снижена угроза для каждого типа нарушения. Новый риск рассчитывается по следующей формуле:

$$R_{\text{нов}} = P_{\text{нов}} \times S,$$

где  $R_{\text{нов}}$  – риск после снижения вероятности возникновения угрозы,  $P_{\text{нов}}$  – вероятность после внедрения средства защиты,  $S$  – ценность актива.

Расчет риска возникновения угрозы для каждого типа нарушения:

- 1) Отсутствие сегментации сети:

$$R_{\text{нов}} = 0.0925 \times 3 = 0.2775$$

- 2) Недостаточные меры по мониторингу сетевой активности:

$$R_{\text{нов}} = 0.09075 \times 2 = 0.1815$$

- 3) Недостаточная защита от DDoS-атак:

$$R_{\text{нов}} = 0.065 \times 3 = 0.195$$

- 4) Использование устаревших версий ПО:

$$R_{\text{нов}} = 0.31405 \times 3 = 0.94215$$

Для финальной оценки влияния внедренных мер защиты был рассчитан параметр снижения риска  $\Delta R$ . Это значение отражает разницу между исходным и скорректированным риском, которая напрямую зависит от коэффициента эффективности защиты. Таким образом,  $\Delta R$  показывает, насколько значимым является вклад защитных мер в уменьшение угроз. Расчет снижения риска производится по следующей формуле:

$$\Delta R = R_{\text{стар}} - R_{\text{нов}},$$

где  $\Delta R$  – параметр снижения риска,  $R_{\text{стар}}$  – исходное значение риска,  $R_{\text{нов}}$  – риск после снижения вероятности возникновения угрозы.

Произведён расчет снижения риска для каждого типа нарушения:

1) Отсутствие сегментации сети:

$$\Delta R = 0.9 - 0.2775 = 0.6225$$

2) Недостаточные меры по мониторингу сетевой активности:

$$\Delta R = 0.75 - 0.1815 = 0.5685$$

3) Недостаточная защита от DDoS-атак:

$$\Delta R = 0.975 - 0.195 = 0.78$$

4) Использование устаревших версий ПО:

$$\Delta R = 1.65 - 0.94215 = 0.70785$$

Таким образом, предложенная топология сети обеспечивает надежную защиту сервера с ПДн за счет сегментации сети, многоуровневой фильтрации трафика и комплексного мониторинга.

**Вывод.** В статье исследована типовая топология ИСПДн, проведен анализ аудита таких систем в двадцати организациях КИИ, выделены и систематизированы значимые недостатки, влекущие серьезные риски ИБ важных активов. На основе анализа выявляемых нарушений безопасности и оценки рисков по смешанной модели предложена топология сети, обеспечивающая повышенную защиту типовой инфраструктуры ИСПДн организации.

Проведённая количественная оценка рисков информационной безопасности продемонстрировала существенное снижение уровня угроз после внедрения защитных мер. Результаты расчётов показали значительное уменьшение показателей риска по всем рассматриваемым категориям. Полученные данные подтверждают эффективность реализованных защитных механизмов, выражающуюся в существенном снижении расчётных значений рисков по всем исследуемым направлениям. Цель работы достигнута.

Результаты работы могут быть использованы разработчиками активного сетевого оборудования и сетевых средств защиты информации, сотрудниками служб информационной безопасности в целях защиты корпоративных ИСПДн объектов КИИ.

Дальнейшей задачей в рамках данного исследования является оптимизация сетевой инфраструктуры ИСПДн с учетом перспективных методов защиты и современных угроз информационной безопасности на основе разработки адаптивных механизмов защиты, способных динамически реагировать на изменения в структуре атак и минимизировать риски для критически важных активов.

**Благодарности.** Исследование выполнено при финансовой поддержке Минцифры России («Грант ИБ МТУСИ № 40469 №22/21-к и №10/22-к»).

**Acknowledgments.** The study was carried out with the financial support of the Ministry of Digital Development of the Russian Federation (Grant IB MTUCI No. 40469 No. 22/21-k and No. 10/22-k).

#### Библиографический список:

1. Миняев А.А., Красов А.В., Сахаров Д.В. Метод оценки эффективности системы защиты информации территориально-распределенных информационных систем персональных данных. Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1: Естественные и технические науки. 2020. № 1. С. 29-33 (15.08.2024).
2. Красов А.В., Лансере Н.Н., Фадеев И.И., Гельфанд А.М., Лесневский М.В. Типовые офтальмологические информационные системы, являющиеся объектами критической информационной инфраструктуры. Офтальмохирургия. 2022. № S4. С. 85-91 (15.08.2024).
3. Миняев А.А. Моделирование угроз безопасности информации в территориально-распределенных информационных системах. Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2021. Т. 13. № 2. С. 52-65.
4. Lipatnikov V., Tikhonov V., Shevchenko A., Saharov D., Polyanicheva A. Security management in large-scale heterogeneous network systems based on intelligent information security services. В сборнике: ACM International Conference Proceeding Series. 5, The Premier Conference on Smart Next Generation Networking Technologies. Сер. "ICFNDS 2021 - 5th International Conference on Future Networks and Distributed Systems: The Premier Conference on Smart Next Generation Networking Technologies" 2021. С. 562-567 (19.08.2024).

5. Korshunov G.A., Lipatnikov V.A., Shevchenko A.A. Decision support systems for information protection in the management of the information network. В сборнике: Fuzzy Technologies in the Industry - FTI 2018. Proceedings of the II International Scientific and Practical Conference. Сер. "CEUR Workshop Proceedings" 2018. С. 418-426.
6. Ковцур М.М., Сахаров Д.В., Бирих Э.В., Дрепа В.Е. Метод обнаружения wlan точек доступа нарушителя в распределенной ИСПДн // Электросвязь. 2024. № 12-2. С. 60-69 (22.08.2024).
7. Сахаров Д.В., Штеренберг С.И., Левин М.В., Колесникова Ю.А. Разработка модели обеспечения отказоустойчивости сети передачи данных. Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. 2016. Т. 34. № 4. С. 14-20 (25.08.2024).
8. Синельщиков В. С., Цветков А. Ю. Защита персональных данных на предприятии //Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2021). – 2021. – С. 653-657 (26.08.2024).
9. Бирих Э.В. Разработка программного модуля для автоматизации определения уровня защищенности в ИСПДн / Булова М.Д., Казанцев А.А., Миняев А.А. //В сборнике: Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2024). Материалы XIII Международной научно-технической и научно-методической конференции. Санкт-Петербург, 2024. С. 122-127 (27.08.2024).
10. Лаврова Д.С., Попова Е.А., Штыркина А.А., Штеренберг С.И. Предупреждение Dos-атак путем прогнозирования значений корреляционных параметров сетевого трафика. Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. – 2018. – №. 3. – С. 70-77.
11. Kovtsur M., Minyaev A., Khramtsov D., Abramenko G. Investigation of attacks and methods of protection of wireless networks during authorization using the iee 802.1x protocol. В сборнике: ACM International Conference Proceeding Series. 5, The Premier Conference on Smart Next Generation Networking Technologies. Сер. "ICFNDS 2021 - 5th International Conference on Future Networks and Distributed Systems: The Premier Conference on Smart Next Generation Networking Technologies" 2021. С. 555-561 (4.09.2024).
12. Minyaev A.A., Krasov A.V., Saharov D.V. The method and methodology of efficiency assessment of protection system of distributed information systems. В сборнике: 12th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops, ICUMT 2020. Brno, 2020. С. 291-295 (6.09.2024).
13. Сахаров Д.В., Ковцур М.М., Бахтин Д.В. Модель защиты от эксплойтов и руткитов с последующим анализом и оценкой инцидентов. Научно-технические исследования в космических исследованиях Земли. 2019. Т. 11. № 5. С. 22-31.
14. Федеральный закон «О внесении изменений в Уголовный кодекс Российской Федерации» от 30.11.2024 № 421-ФЗ.
15. Приказ ФСТЭК России "Об утверждении состава и содержания организационных и технических мер по обеспечению безопасности персональных данных при их обработке в информационных системах персональных данных" от 18.02.2013 № 21. URL: <https://fstec.ru/dokumenty/vse-dokumenty/prikazy/prikaz-fstek-rossii-ot-18-fevralya-2013-g-n-21>. - 2013 г. - с изм. и допол. в ред. от 25.11.2022. (20.09.2024).
16. Приказ ФСТЭК России "Об утверждении требований к обеспечению защиты информации в автоматизированных системах управления производственными и технологическими процессами на критически важных объектах, потенциально опасных объектах, а также объектах, представляющих повышенную опасность для жизни и здоровья людей и для окружающей природной среды" от 14.03.2014 № 31. URL: <https://fstec.ru/dokumenty/vse-dokumenty/prikazy/prikaz-fstek-rossii-ot-14-marta-2014-g-n-31>. - 2014 г. - с изм. и допол. в ред. от 16.01.2023. (20.09.2024).
17. Risk management guide for information technology systems. Recommendations of the National Institute of Standards and Technology: NIST 800-30. – Введ. 06.01.2002. – США. – 2002. – 56 с. (22.09.2024).
18. Информационные технологии. Методы и средства обеспечения безопасности. Ч. 3. Методы менеджмента безопасности информационных технологий: ГОСТ Р ИСО/МЭК ТО 13335-3-2007. – Введ. 01.09.2007. – М.: Стандартинформ, 2007. – 76 с (23.09.2024).
19. Андрианов В.И., Красов А.В., Липатников В.А. Инновационное управление рисками информационной безопасности. Учебное пособие / Санкт-Петербург, 2012 (24.09.2024).
20. Аналитический отчет: Ландшафт киберугроз для России и СНГ 2024 // Лаборатория Касперского. URL: [https://go.kaspersky.com/rs/802-IJN-240/images/Report\\_Threat\\_Landscape\\_RU.pdf](https://go.kaspersky.com/rs/802-IJN-240/images/Report_Threat_Landscape_RU.pdf) (24.01.2025).
21. Every third cyber incident was due to ransomware, Kaspersky reports // Лаборатория Касперского URL: <https://securelist.com/state-of-ransomware-2023/112590/> (дата обращения: 24.10.2024).
22. Отчеты от центров экспертизы «Лаборатории Касперского»: комплексный анализ актуальных угроз, технологий и трендов - всё для усиления вашей кибербезопасности. // Лаборатория Касперского URL: <https://www.kaspersky.ru/enterprise-security/resources/white-papers> (25.01.2025).
23. Бирих Э.В. К вопросу об аудите персональных данных / Ферапонтова С.С. // В сборнике: Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2018). VII Международная научно-техническая и научно-методическая конференция. Сборник научных статей. В 4-х томах. Под редакцией С.В. Бачевского. 2018. С. 111-114. (27.01.2025).
24. Korshunov G.I., Lipatnikov V.A., Omarov R.G., Varzhapetian A.G. Prevention of attacks with distributed denial of service for information networks of cyberphysical systems. В сборнике: JOP Conference Series: Metrological Support of Innovative Technologies. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. Krasnoyarsk, Russia, 2020. С. 32060. (27.01.2025).
25. Как устаревшие технологии ставят под угрозу безопасность и эффективность бизнеса // vc.ru — бизнес, технологии, идеи, модели роста, стартапы URL: <https://vc.ru/u/2040785-gruppa-kompanii-x-com/1417550-kak-ustarevshie-tehnologii-stavyat-pod-ugrozu-bezopasnost-i-effektivnost-biznesa> (25.10.2024).
26. Бирих Э.В., Ферапонтова С.С. К вопросу об аудите персональных данных // В сборнике: Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2018). VII Международная научно-техническая и научно-методическая конференция. Сборник научных статей. В 4-х томах. Под редакцией С.В. Бачевского. 2018. С. 111-114.
27. Yurkin D.V., Livshitz I.I., Minyaev A.A. Formation of the instantaneous information security audit concept. Communications in Computer and Information Science. 2016. Т. 678. С. 314-324. Kashevnik A., Ponomarev A., Krasov A.

- Human-computer threats classification in intelligent transportation systems. Conference of Open Innovations Association, FRUCT. 2020. № 26. С. 151-157. (27.01.2025).
28. Doynikova E.V., Fedorchenko A.V., Novikova E.S., Ushakov I.A., Krasov A.V. Security decision support in the control systems based on graph models. В сборнике: Proceedings of 2021 IV International Conference on Control in Technical Systems (CTS). IEEE, 2021. С. 224-227. (28.01.2025).
  29. Balueva A., Desnitsky V., Ushakov I. Approach to detection of denial-of-sleep attacks in wireless sensor networks on the base of machine learning. Studies in Computational Intelligence. 2020. Т. 868. С. 350-355. (2.02.2025).
  30. Vitkova L., Saenko I., Tushkanova O. An approach to creating an intelligent system for detecting and countering inappropriate information on the internet. Studies in Computational Intelligence. 2020. Т. 868. С. 244-254. (4.02.2025).
  31. Krasov A., Vitkova L., Pestov I. Behavioral analysis of resource allocation systems in cloud infrastructure. В сборнике: Proceedings - 2019 International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2019. 2019. С. 8867699.
  32. Kotenko I., Vitkova L., Saenko I., Tushkanova O., Branitskiy A. The intelligent system for detection and counteraction of malicious and inappropriate information on the internet. AI Communications. 2020. -Т. -33. № 1. -С. 13-25.
  33. Zhernova K., Chechulin A. Overview of vulnerabilities of decision support interfaces based on virtual and augmented reality technologies. Lecture Notes in Networks and Systems. 2022. Т. 330 LNNS. С. 400-409. (7.02.2025).
  34. Buinevich M., Izrailov K., Kotenko I., Ushakov I., Vlasov D. Approach to combining different methods for detecting insiders. В сборнике: ACM International Conference Proceeding Series. 4. Сер. "Proceedings of the 4th International Conference on Future Networks and Distributed Systems, ICFNDS 2020" 2020. С. 3442619. (7.02.2025).
  35. Бирих Э.В., Паскенова А.У. Комплексная защита объекта информатизации // В сборнике: Технологии информационного общества. Сборник трудов XIX Международной отраслевой научно-технической конференции. Москва, 2025. С. 136-138. (8.02.2025).
  36. IPS/IDS — системы обнаружения и предотвращения вторжений // Selectel — аренда IT-инфраструктуры для бизнеса URL: <https://selectel.ru/blog/ips-and-ids/> (25.10.2024).
  37. Сегментация сети в парадигме результативной кибербезопасности // Результативная кибербезопасность URL: <https://rezbez.ru/article/segmentacziya-seti-v-paradigme-rezultativnoj-kiberbezopasnosti> (дата обращения: 25.01.2024).
  38. Липатников В.А., Сахаров Д.В., Кузнецов И.А. Управление безопасностью распределенной ивс на основе прогноза заражения компьютерным вирусом. Электросвязь. 2017. № 1. С. 53-59. (9.02.2025).
  39. Медведева И.М., Бирих Э.В. Методы защиты от утечек конфиденциальной информации и персональных данных // Актуальные проблемы социально-гуманитарного и научно-технического знания. 2025. № 1(41). С. 5-8.
  40. Бирих Э.В., Булова М.Д., Казанцев А.А., Миняев А.А. Разработка программного модуля для автоматизации определения уровня защищенности в ИСПДН // В сборнике: Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2024). Материалы XIII Международной научно-технической и научно-методической конференции. Санкт-Петербург, 2024. С. 122-127 (14.02.2025).
  41. Махмутова Н.Ф., Бирих Э.В., Сахаров Д.В., Кривец А.С., Дегтярев М.А. Исследование способов повышения безопасности корпоративных сетей. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2024;51(3):110-116. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2024-51-3-110-116> (17.02.2025).
  42. Ковцур М.М., Сахаров Д.В., Бирих Э.В., Дрепа В.Е. Метод обнаружения wlan точек доступа нарушителя в распределенной ИСПДН // Электросвязь. 2024. № 12-2. С. 60-69. (18.02.2025).
  43. Сахаров Д.В., Красов А.В., Ушаков И.А., Орлов Г.А. Защищенная модель программно-определяемой сети в среде виртуализации KVM. Электросвязь. 2020. № 3. С. 26-32. (23.02.2025).
  44. Андрианов В.И., Бухарин В.В., Кирьянов А.В., Липатников В.А., Санин И.Ю., Сахаров Д.В., Стародубцев Ю.И. Способ защиты информационно-вычислительных сетей от компьютерных атак // Патент на изобретение RU 2472211 С1, 10.01.2013. Заявка № 2011147613/08 от 23.11.2011 (24.02.2025).

#### References:

1. Minyaev A.A., Krasov A.V., Sakharov D.V. A method for evaluating the effectiveness of the information protection system of geographically distributed personal data information systems. *Bulletin of the St. Petersburg State University of Technology and Design. Series 1: Natural and Technical Sciences*. 2020; 1: 29-33. (08/15/2024) (In Russ).
2. Krasov A.V., Lancere N.N., Fadeev I.I., Gelfand A.M., Lesnevsky M.V. Typical ophthalmological information systems that are objects of critical information infrastructure. *Ophthalmosurgery*. 2022; S4: 85-91. (08/15/2024). (In Russ).
3. Minyaev A.A. Modeling of information security threats in geographically distributed information systems. High-tech technologies in space exploration of the Earth. 2021; 13(2):52-65. (In Russ).
4. Lipatnikov V., Tikhonov V., Shevchenko A., Saharov D., Polyanicheva A. Security management in large-scale heterogeneous network systems based on intelligent information security services. In the collection: ACM International Conference Proceeding Series. 5, The Premier Conference on Smart Next Generation Networking Technologies. Ser. "ICFNDS 2021 - 5th International Conference on Future Networks and Distributed Systems: The Premier Conference on Smart Next Generation Networking Technologies" 2021: 562-567. (08/19/2024).
5. Korshunov G.A., Lipatnikov V.A., Shevchenko A.A. Decision support systems for information protection in the management of the information network. In the collection: Fuzzy Technologies in the Industry - FTI 2018. Proceedings of the II International Scientific and Practical Conference. Ser. "CEUR Workshop Proceedings" 2018: 418-426.
6. Kovtsur M.M., Sakharov D.V., Birikh E.V., Drepa V.E. Method of detecting wlan access points of an intruder in a distributed ISPDn. *Telecommunication*. 2024;12-2: 60-69 (08/22/2024). (In Russ).
7. Sakharov D.V., Shterenberg S.I., Levin M.V., Kolesnikova Yu.A. Development of a data transmission network fault tolerance model. News of higher educational institutions. *Technology of light industry*. 2016; 34(4):14-20. (08/25/2024). (In Russ).
8. Sinelshchikov V. S., Tsvetkov A. Yu. Protection of personal data at the enterprise. *Actual problems of infotelec communications in science and education* (APINO 2021). 2021:653-657 (08/26/2024). (In Russ).
9. Birikh E.V. Development of a software module for automating the determination of the security level in ISPs / Bulova M.D., Kazantsev A.A., Minyaev A.A. // In the collection: Actual problems of infotelec communications in science and

- education (APINO 2024). Proceedings of the XIII International Scientific, Technical, Scientific and Methodological Conference. Saint Petersburg, 2024:122-127 (08/27/2024). (In Russ).
10. Lavrova D.S., Popova E.A., Shtyrkina A.A., Shterenberg S.I. Prevention of Dos attacks by predicting the values of correlation parameters of network traffic. *Information security issues. Computer systems*. 2018;3:70-77. (In Russ).
  11. Kovtsur M., Minyaev A., Khramtsov D., Abramenko G. Investigation of attacks and methods of protection of wireless networks during authorization using the ieee 802.1x protocol. In the collection: ACM International Conference Proceeding Series. 5, The Premier Conference on Smart Next Generation Networking Technologies. Ser. "ICFNDS 2021 - 5th International Conference on Future Networks and Distributed Systems: The Premier Conference on Smart Next Generation Networking Technologies" 2021:555-561. (09/4/2024).
  12. Minyaev A.A., Krasov A.V., Saharov D.V. The method and methodology of efficiency assessment of protection system of distributed information systems. In the collection: 12th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops, ICUMT 2020. Brno, 2020: 291-295. (09/6/2024).
  13. Sakharov D.V., Kovtsur M.M., Bakhtin D.V. A model of protection against exploits and rootkits with subsequent analysis and assessment of incidents. *High-tech technologies in space exploration of the Earth*. 2019;11(5):22-31. (In Russ).
  14. Federal Law "On Amendments to the Criminal Code of the Russian Federation" dated 11/30/2024 No. 421-FZ.
  15. Order of the FSTEC of Russia "On Approval of the Composition and Content of Organizational and Technical Measures to Ensure the Security of Personal Data during their Processing in Personal Data Information Systems" dated 02/18/2013 No. 21. URL: <https://fstec.ru/dokumenty/vse-dokumenty/prikazy/prikaz-fstek-rossii-ot-18-fevralya-2013-g-n-21> . - 2013 - with amendments and additions. ed. dated 11/25/2022. (09/20/2024). (In Russ).
  16. Order of the FSTEC of Russia "On Approval of Requirements for Information Security in Automated Control Systems for Production and Technological Processes at Critical Facilities, Potentially Dangerous Facilities, as well as Facilities that pose an Increased Danger to Human Life and Health and to the Environment" dated 03/14/2014 No. 31. URL: <https://fstec.ru/dokumenty/vse-dokumenty/prikazy/prikaz-fstek-rossii-ot-14-marta-2014-g-n-31> - 2014 - with amendments and additions. ed. from 01/16/2023. (09/20/2024). (In Russ).
  17. Risk management guide for information technology systems. Recommendations of the National Institute of Standards and Technology: NIST 800-30. – Introduction. 06.01.2002. – USA. – 2002: 56 (09/22/2024).
  18. Information technology. Methods and means of ensuring security. Part 3. Methods of information technology security management: GOST R ISO/IEC TO 13335-3-2007. – Introduction. 09/01/2007. Moscow: Standartinform, 2007:76 (09/23/2024). (In Russ).
  19. Andrianov V.I., Krasov A.V., Lipatnikov V.A. Innovative information security risk management. Textbook / Saint Petersburg, 2012 (09/24/2024). (In Russ).
  20. Analytical report: The Cyber Threat Landscape for Russia and the CIS 2024 // Kaspersky Lab. URL: [https://go.kaspersky.com/rs/802-IJN-240/images/Report\\_Threat\\_Landscape\\_RU.pdf](https://go.kaspersky.com/rs/802-IJN-240/images/Report_Threat_Landscape_RU.pdf) (24.01.2025). (In Russ).
  21. Every third cyber incident was due to ransomware, Kaspersky reports // Kaspersky Lab URL: <https://securelist.com/state-of-ransomware-2023/112590/> / (accessed: 10/24/2024).
  22. Reports from Kaspersky Lab's Expertise Centers: Comprehensive analysis of current threats, technologies, and trends - everything to enhance your cybersecurity. // Kaspersky Lab URL: <https://www.kaspersky.ru/enterprise-security/resources/white-papers> (01/25/2025).
  23. Birikh E.V. On the issue of personal data audit / Ferapontova S.S. In the collection: Actual problems of infotelec communications in science and education (APINO 2018). VII International Scientific, Technical, Scientific and Methodological Conference. Collection of scientific articles. In 4 volumes. Edited by S.V. Bachevsky. 2018:111-114 (01/27/2025). (In Russ).
  24. Korshunov G.I., Lipatnikov V.A., Omarov R.G., Varzhapetian A.G. Prevention of attacks with distributed denial of service for information networks of cyberphysical systems. In the collection: JOP Conference Series: Metrological Support of Innovative Technologies. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. Krasnodar, Russia, 2020. pp. 32060. (01/27/2025).
  25. How outdated technologies jeopardize business security and efficiency // vc.ru — business, technology, ideas, growth models, startups URL: <https://vc.ru/u/2040785-gruppa-kompanii-x-com/1417550-kak-ustarevshie-tehnologii-stavyat-pod-ugrozu-bezopasnost-i-effektivnost-biznesa> (10/25/2024). (In Russ).
  26. Birikh E.V., Ferapontova S.S. On the issue of personal data audit. In the collection: Actual problems of infotelec communications in science and education (APINO 2018). VII International Scientific, Technical, Scientific and Methodological Conference. Collection of scientific articles. In 4 volumes. Edited by S.V. Bachevsky. 2018:111-114. (In Russ).
  27. Yurkin D.V., Livshitz I.I., Minyaev A.A. Formation of the instantaneous information security audit concept. Communications in Computer and Information Science. 2016. Vol. 678. pp. 314-324. Kashevnik A., Ponomarev A., Krasov A. Human-computer threats classification in intelligent transportation systems. *Conference of Open Innovations Association, FRUCT*. 2020; 26:151-157. (01/27/2025).
  28. Doynikova E.V., Fedorchenko A.V., Novikova E.S., Ushakov I.A., Krasov A.V. Security decision support in the control systems based on graph models. In the collection: Proceedings of the 2021 IV International Conference on Control in Technical Systems (CTS). IEEE, 2021: 224-227. (01/28/2025).
  29. Balueva A., Desnitsky V., Ushakov I. Approach to detection of denial-of-sleep attacks in wireless sensor networks on the base of machine learning. *Studies in Computational Intelligence*. 2020; 868: 350-355. (2.02.2025).
  30. Vitkova L., Saenko I., Tushkanova O. An approach to creating an intelligent system for detecting and countering inappropriate information on the internet. *Studies in Computational Intelligence*. 2020; 868: 244-254. (02/14/2025).
  31. Krasov A., Vitkova L., Pestov I. Behavioral analysis of resource allocation systems in cloud infrastructure. In the collection: Proceedings - 2019 International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2019. 2019.:8867699.
  32. Kotenko I., Vitkova L., Saenko I., Tushkanova O., Branitskiy A. The intelligent system for detection and counteraction of malicious and inappropriate information on the internet. *AI Communications*. 2020; 33(1):13-25.
  33. Zhernova K., Chechulin A. Overview of vulnerabilities of decision support interfaces based on virtual and augmented reality technologies. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2022; 330 LNNS:400-409 (02/7/2025).

34. Buinevich M., Izrailov K., Kotenko I., Ushakov I., Vlasov D. Approach to combining different methods for detecting insiders. In the collection: ACM International Conference Proceeding Series. 4. Proceedings of the 4th International Conference on Future Networks and Distributed Systems, ICFNDS 2020, 2020: 3442619. (02/7/2025).
35. Birikh E.V., Paskenova A.U. Complex protection of the informatization object // In the collection: Information Society Technologies. Proceedings of the XIX International Industrial Scientific and Technical Conference. Moscow, 2025. pp. 136-138 (02/08/2025). (In Russ).
36. IPS/IDS - intrusion detection and prevention systems. Selectel - rental of IT infrastructure for business URL: <https://selectel.ru/blog/ips-and-ids/> (10/25/2024). (In Russ).
37. Network segmentation in the effective cybersecurity paradigm. Effective cybersecurity URL: <https://rezbez.ru/article/segmentaciya-seti-v-paradigme-rezultativnoj-kiberbezopasnosti> (date of reference: 01/25/2024).
38. Lipatnikov V.A., Sakharov D.V., Kuznetsov I.A. Security management of a distributed IVS based on the prediction of infection with a computer virus. *Telecommunications*. 2017;1:53-59. (02/9/2025). (In Russ).
39. Medvedeva I.M., Birikh E.V. Methods of protection against leaks of confidential information and personal data. *Actual problems of socio-humanitarian and scientific-technical knowledge*. 2025;1 (41): 5-8. (In Russ).
40. Birikh E.V., Bulova M.D., Kazantsev A.A., Minyaev A.A. Development of a software module for automating the determination of the security level in ISPS // In the collection: Current problems of infotelec communications in science and education (APINO 2024). Proceedings of the XIII International Scientific, Technical, Scientific and Methodological Conference. Saint Petersburg, 2024. pp. 122-127 (02/14/2025). (In Russ).
41. Makhmutova N.F., Birikh E.V., Sakharov D.V., Krivets A.S., Degtyarev M.A. Investigation of ways to improve the security of corporate networks. *Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences*. 2024;51(3):110-116. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2024-51-3-110-116> (02/17/2025). (In Russ).
42. Kovtsur M.M., Sakharov D.V., Birikh E.V., Drepa V.E. A method for detecting an intruder's wlan access points in a distributed ISPDN. *Telecommunications*. 2024;12-2: 60-69 (02/18/2025). (In Russ).
43. Sakharov D.V., Krasov A.V., Ushakov I.A., Orlov G.A. A secure model of a software-defined network in a KVM virtualization environment. *Telecommunications*. 2020; 3:26-32 (02/23/2025). (In Russ).
44. Andrianov V.I., Bukharin V.V., Kiryanov A.V., Lipatnikov V.A., Sanin I.Yu., Sakharov D.V., Starodubtsev Yu.I. A method for protecting information and computing networks from computer attacks. Patent for invention RU 2472211 C1, 10.01.2013. Application No. 2011147613/08 dated 11/23/2011 (02/24/2025). (In Russ).

#### Сведения об авторах:

Бирих Эрнест Владимирович, старший преподаватель, кафедра защищенных систем связи; [be1982@mail.ru](mailto:be1982@mail.ru). ORCID.org/0000-0003-4808-9422

Фадеев Илья Игоревич, ассистент, кафедра защищенных систем связи; [fadeev.collapse@yandex.ru](mailto:fadeev.collapse@yandex.ru). ORCID.org/0009-0003-0256-2330

Николаев Ефим Николаевич, студент, кафедра информационной безопасности компьютерных сетей; [nickolaev.efim@yandex.ru](mailto:nickolaev.efim@yandex.ru). ORCID.org/0009-0005-7805-4249

Сахаров Дмитрий Владимирович, кандидат технических наук, доцент, доцент, кафедра защищенных систем связи; [sguard7@mail.ru](mailto:sguard7@mail.ru). ORCID.org/0000-0002-6130-5321

Лужников Павел Алексеевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент, кафедра защищенных систем связи; [Pavel\\_oreshek1@mail.ru](mailto:Pavel_oreshek1@mail.ru). ORCID.org/0009-0000—0693-0960

#### Information about the authors:

Ernest V. Birikh, Senior Lecturer, Department of Secure Communication Systems; [be1982@mail.ru](mailto:be1982@mail.ru). ORCID.0000-0003-4808-9422

Ilya I. Fadeev, Assistant, Department of Secure Communication Systems; [fadeev.collapse@yandex.ru](mailto:fadeev.collapse@yandex.ru). ORCID.0009-0003-0256-2330

Efim N. Nikolaev, Student, Department of Information Security of Computer Networks; [nickolaev.efim@yandex.ru](mailto:nickolaev.efim@yandex.ru). ORCID.0009-0005-7805-4249

Dmitrii V. Sakharov, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Assoc. Prof. of the Department of Secure Communication Systems; [sguard7@mail.ru](mailto:sguard7@mail.ru). ORCID.0000-0002-6130-5321

Pavel A. Luzhnikov, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Assoc. Prof. of the Department of Secure Communication Systems; [Pavel\\_oreshek1@mail.ru](mailto:Pavel_oreshek1@mail.ru). ORCID.0009-0000—0693-0960

#### Конфликт интересов/Conflict of interest.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов/The authors declare no conflict of interest. Поступила в редакцию/Received 15.09.2025.

Одобрена после рецензирования/Revised 21.10.2025.

Принята в печать/Accepted for publication 29.10. 2025.

## **Метод расчёта индивидуального пожарного риска для крупных складских комплексов**

**А.С. Глуханов**

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет,  
190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4, Россия

**Резюме. Цель.** Целью исследования является оценка соответствия крупного складского комплекса требованиям пожарной безопасности, проведения анализа уровня пожарной опасности. **Метод.** В статье представлен метод для вычисления количественных индикаторов, характеризующих уровень пожарной опасности для больших складских зданий. Разработанный метод предназначен для достоверной оценки вероятной угрозы появления и развития пожара в пределах крупного складского комплекса. Детально разбираются параметры, оказывающие влияние на образование пожарной опасности, такие как архитектурно-планировочные особенности, пожарная нагрузка, средства пожарной безопасности и прочие факторы. **Результат.** Определение пожарного риска основано на вычислении значений, отражающих пожарную опасность для рассматриваемого объекта. Полученные в результате расчетов данные сопоставляются с предельными значениями, определенными в нормативных документах. Вычисленные параметры пожарного риска представляют собой количественное выражение вероятности возникновения пожара на объекте, показывают возможные последствия для людей, находящихся в здании, и сохранности материальных ресурсов. **Вывод.** Метод расчета индивидуального пожарного риска может применяться для реализации мероприятий по предотвращению возгораний, гарантированию безопасности персонала и сохранности материальных ресурсов на складских объектах. Предлагаемый подход дает возможность оптимизировать расходы на пожарную безопасность объекта за счет выбора наиболее целесообразных и аргументированных решений. Автором предложены дополнительные меры для обеспечения противопожарных мероприятий в складском комплексе.

**Ключевые слова:** оценка пожарного риска, крупный складской комплекс, пожарная безопасность, индивидуальный пожарный риск, опасные факторы пожара, обеспечение противопожарной безопасности.

**Для цитирования:** А.С. Глуханов. Метод расчёта индивидуального пожарного риска для крупного складского комплекса. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025;52(4):63-72. DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-4-63-72.

## **Method for calculating individual fire risk for a large warehouse complex**

**A.S. Glukhanov**

St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering,  
4 2-ya Krasnoarmeyskaya Str., St. Petersburg 190005, Russia

**Abstract. Objective.** The objective of this study is to assess a large warehouse complex's compliance with fire safety requirements and analyze its fire hazard level. **Method.** A method for calculating quantitative indicators of fire hazard levels for large warehouse buildings is presented. The developed method is designed to reliably assess the potential threat of a fire breaking out and developing in a large warehouse complex. Fire hazard generation parameters are examined in detail, including architectural and planning features, fire load, fire safety equipment, and more. **Result.** Fire risk determination is based on calculating values reflecting the fire hazard for the facility in question. The resulting data are compared with the limit values defined in regulatory

documents. The calculated fire risk parameters quantify the likelihood of a fire occurring at a facility and demonstrate the potential consequences for building occupants and the safety of material resources. **Conclusion.** The individual fire risk calculation method can be used to implement fire prevention measures, ensure personnel safety, and safeguard material resources at warehouse facilities. The proposed approach enables optimization of facility fire safety costs by selecting the most appropriate and well-reasoned solutions. The author proposes additional measures to ensure fire safety in warehouse facilities.

**Keywords:** fire risk assessment, large warehouse complex, fire safety, individual fire risk, fire hazards, fire safety

**For citation:** A.S. Glukhanov. Method for calculating individual fire risk for a large warehouse complex. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2025; 52(4):63-72. (In Russ) DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-4-63-72.

**Введение.** Значительный складской комплекс является собой логистический хаб, спроектированный для управления большими объемами товарного движения. Эти постройки, занимающие площадь более 5000 квадратных метров, представляют собой сложную систему специализированных зон. Обширные пожары, аналогичные тем, что произошли на складах компаний Ozon в Московском регионе и Wildberries в Санкт-Петербурге, влекут за собой серьезные материальные убытки, наносят ущерб экологии и вызывают широкий общественный отклик [1].

Указанные события подчеркивают острую необходимость соблюдения жестких стандартов противопожарной защиты на складских территориях. Оценка пожарных рисков является ключевым этапом в обеспечении безопасности крупного складского комплекса. Этот процесс включает в себя выявление потенциальных очагов возгорания, оценку вероятности их появления и определение возможных последствий для сотрудников, активов и окружающей среды [2]. Складские строения должны быть оборудованы многоуровневой системой противопожарной защиты, чья задача заключается в недопущении возгораний, обеспечении безопасности людей, находящихся на территории объекта, и сохранении материальных ценностей. Для гарантирования пожарной безопасности, согласно установленным нормам [3, 4], необходим всесторонний подход, нацеленный на предотвращение первичного появления очагов огня [5, 6]. Исходя из принципов, изложенных в [4], индивидуальный уровень пожарного риска в зданиях не должен превышать порог в  $10^{-6}$  в год для сотрудника склада.

**Постановка задачи.** Предлагаемый метод для вычисления количественных показателей, характеризующих уровень пожарной опасности больших складских зданий, основывается на комплексном анализе множества факторов, влияющих на возникновение и распространение пожара. Результатом применения предложенного метода является получение количественных оценок уровня пожарной опасности для каждого конкретного складского здания. Эти оценки могут быть использованы для разработки и реализации эффективных мер по предотвращению пожаров и минимизации их последствий, служить основой для принятия управленческих решений, направленных на повышение уровня пожарной безопасности складских помещений.

**Методы исследования.** Для изучения прогрессирования пожара использовалась полевая модель, реализованная в программном обеспечении FDS (Fire Dynamic Simulator) [7]. Процесс эвакуации смоделирован с применением индивидуально-поточной модели перемещения людей, реализованной в программном комплексе Fenix+ (Подтверждено заключением Академии ГПС МЧС РФ №34/25-2013 от 01.04.2013). Для определения степени вероятности наступления пожароопасной ситуации используется индикатор риска летального исхода, обусловленного воздействием опасных факторов пожара [8]. Этот индикатор включает в себя: возможность гибели сотрудников, присутствующих на территории производственного объекта; возможность гибели лиц, временно находящихся на объекте; возможность гибели населения, проживающего в окрестностях объекта. Оценка вероятного риска

$P_i$  (год<sup>-1</sup>) для конкретного помещения склада определяется с использованием следующего выражения (1) [8]:

$$P(a) = \sum_{j=1}^J Q_{aj}(a) \cdot Q_j \quad (1)$$

где  $J$  – число вероятных вариантов развития пожара в пределах помещения склада;  
 $Q_j$  – частоту возникновения определенного сценария развития пожара, год<sup>-1</sup>;  
 $Q_{aj}(a)$  – вероятность причинения вреда здоровью человека, находящегося в пространстве  $i$ , при реализации пожарной ситуации  $j$ .

Условная вероятность нанесения ущерба здоровью человека под воздействием опасных факторов пожара рассчитывается на основе следующих критериев (2):

$$Q_{aj}(a) = 1 - \prod_{k=1}^h (1 - Q_k \cdot Q_{djk}(a)) \quad (2)$$

где  $h$  – количество анализируемых опасных происшествий;  
 $Q_k$  – вероятность возникновения опасного происшествия;  
 $Q_{djk}(a)$  – вероятность нанесения ущерба здоровью человека опасным происшествием.  
 Оценка возможности благополучной эвакуации определяется выражением (3):

$$P_{\text{Э}ij} = 1 - (1 - P_{\text{Э.П}ij}) \cdot (1 - P_{\text{Д.В}ij}) \quad (3)$$

где  $P_{\text{Э.П}ij}$  – возможность успешной эвакуации сотрудника из  $i$  помещения здания, использующих пути эвакуации;

$P_{\text{Д.В}ij}$  – возможность покинуть сотрудником  $i$  пространство посредством путей эвакуации.

Оценка возможности осуществления эвакуации по заданным эвакуационным путям производится с использованием следующей методологии расчета [9, 10]:

$$P_{\text{Э.П}ij} = \begin{cases} \frac{0,8 \cdot \tau_{\text{бл}ij} - t_{Pij}}{\tau_{\text{Н.Э}}}, & \text{если } t_{Pij} < 0,8 \cdot \tau_{\text{бл}ij} < t_{Pij} + \tau_{\text{Н.Э}ij} \\ 0,999, & \text{если } t_{Pij} + \tau_{\text{Н.Э}ij} \leq 0,8 \cdot \tau_{\text{бл}ij} \\ 0,001, & \text{если } t_{Pij} \geq 0,8 \cdot \tau_{\text{бл}ij} \end{cases} \quad (4)$$

где  $\tau_{\text{бл}ij}$  – интервал, измеряемый с момента инициации  $j$  сценария пожара до момента, когда эвакуационные маршруты становятся недоступны, мин;

$t_{Pij}$  – временной интервал для осуществления полной эвакуации персонала из  $i$  участка при возникновении пожара в соответствии с  $j$  сценарием развития событий, мин;

$\tau_{\text{Н.Э}ij}$  – временной отрезок, охватывающий период от момента начала пожара, соответствующего  $j$  сценарию, до начала активной фазы эвакуации людей из  $i$  участка, мин.

Вероятность  $D_{ij}$  успешной работы противопожарных систем в  $i$  помещении при развитии пожара по  $j$  варианту развития событий определяется с использованием следующего математического выражения:

$$D_{ij} = 1 - \prod_{k=1}^K (1 - D_{ijk}) \quad (5)$$

где  $K$  – количество имеющихся технических средств, предназначенных для защиты от пожара;

$D_{ijk}$  – вероятность успешного функционирования  $k$  технического средства при реализации  $j$  сценария пожара в  $i$  помещении здания.

Индивидуальный риск  $R_m$  (год<sup>-1</sup>) для сотрудника  $m$ , находящегося в здании, который обусловлен пожарной опасностью, рассчитывается по следующей формуле:

$$R_m = \sum_{i=1}^N P_i \cdot q_{im} \quad (6)$$

где  $P_i$  - уровень потенциальной опасности, измеренный для  $i$  пространства в пределах здания, год<sup>-1</sup>

$q_{im}$  - вероятность присутствия сотрудника в пространстве;

$N$  - общее число помещений в здании.

Расчетное время эвакуации людей из здания устанавливается по времени выхода из него последнего человека. Перед началом моделирования процесса эвакуации задается схема эвакуационных путей в здании. Все эвакуационные пути подразделяются на эвакуационные участки длиной  $a$  и шириной  $b$ . Эвакуационные участки могут быть горизонтальные и наклонные (лестница вниз, лестница вверх и пандус). Координата каждого человека в момент времени  $t$  представлена на рис. 1 и определяется по формуле (7):

$$x_i(t) = x_i(t-\Delta t) - V_i(t) \cdot \Delta t, \quad (7)$$

где  $x_i(t-\Delta t)$  – координата  $i$ -го человека в предыдущий момент времени, м;

$V_i(t)$  – скорость  $i$ -го человека в момент времени  $t$ , м/с;

$\Delta t$  – промежуток времени, с.

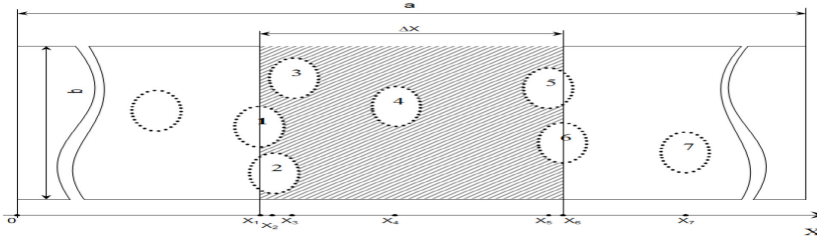


Рис. 1 – Координатная схема размещения людей на путях эвакуации

Fig. 1 – Coordinate diagram of the placement of people on evacuation routes

Скорость перемещения сотрудника склада  $i$  в момент времени  $t$ , обозначаемая как  $V_i(t)$ , рассчитывается, исходя из данных, представленных в [8]. Указанная скорость является зависимой величиной, определяемой двумя существенными факторами: концентрацией людского потока в непосредственной близости от индивидуума,  $D_i(t)$ , а также параметрами выбранного им маршрута эвакуации. Объем людского потока, покидающего один эвакуационный участок и направляющегося на другой за единицу времени, определяется пропускной способностью выхода с конкретного участка, обозначаемой как  $Q_j(t)$ . Данная пропускная способность рассчитывается по следующей формуле [8, 11]:

$$Q_j(t) = q_j(t) \cdot c_j \cdot dt / (f \cdot 60) \text{ чел.}, \quad (8)$$

где  $q_j(t)$  – интенсивность перемещения людского потока, покидающего  $j$  эвакуационный сектор, м/мин;

$c_j$  – ширина эвакуационного проема в рассматриваемой части здания, м;

$dt$  – временной интервал, с;

$f$  – величина поверхности, на которую проецируется силуэт человека в горизонтальной плоскости, м<sup>2</sup>.

**Обсуждение результатов.** Для проведения анализа пожарной безопасности в качестве примера выбран универсальный склад, предназначенный для хранения продовольственных и непродовольственных товаров (рис. 2). Объект отличается следующим набором функциональных возможностей: обработка входящих поставок, размещение и содержание разнообразного ассортимента продовольственных и непродовольственных товаров в изначальной таре; распределение прибывающих партий продукции по категориям; формирование заказов в соответствии с запросами клиентов; предоставление офисных площадей для осуществления управленческих и административных функций логистического складского комплекса. Проектируемый объект состоит из 5 блоков разной площади. Степень огнестойкости здания – II. Класс конструктивной пожарной опасности здания – С0. Категория здания по взрывопожарной и пожарной опасности – В. Максимальная отметка высоты здания

– не более 24 метров. Площадь застройки здания – не более 90 000 м<sup>2</sup>. Строительный объем здания – не более 1 500 000 м<sup>3</sup>. Всего людей на объекте – 1534 человек.

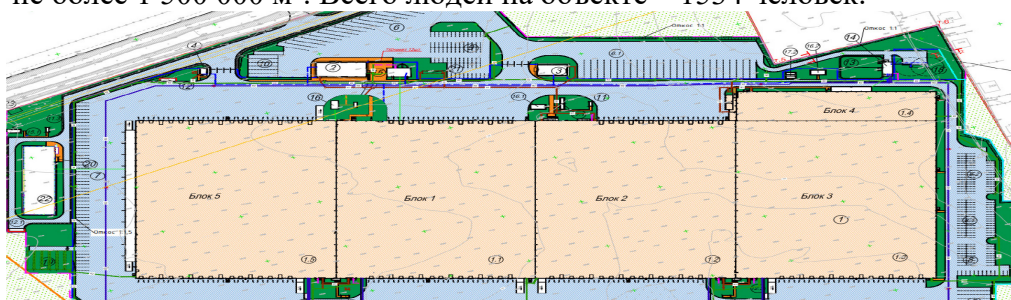


Рис. 2 – План универсального склада продовольственных и непродовольственных товаров  
Fig. 2 – Plan of a universal warehouse for food and non-food products

**Оценка величины пожарного риска.** Здание разделено на пять пожарных отсеков (ПО) противопожарными стенами 1-го типа. Оценка величины пожарного риска рассмотрим на примере ПО №1 (Блок 5, АБЧ 5). Показатели ПО №1 (Блок 5, АБЧ 5) - склад с зоной сортировки товаров народного потребления с устройством мезонина с четырехэтажной административно бытовой встройкой:

- класс функциональной пожарной опасности ПО №1 - Ф 5.2;
- класс функциональной пожарной опасности административно-бытовой встройки – Ф4.3;
- административно-бытовой блок состоит из 4 этажей;
- количество ярусов мезонина - не более 5.
- площадь этажа в пределах пожарного отсека 10400 м<sup>2</sup>.
- количество людей на объекте – 310 человек.

Сценарий пожара (пожарный отсек № 1) – пожар возникает в помещении сортировочного центра, в непосредственной близости к эвакуационному выходу. Максимальная фактическая площадь горения не менее 366,38 м<sup>2</sup>. При расчете приняты следующие условия [11, 12, 13]:

- для обеспечения безопасности объекта необходимо предусмотреть автоматизированные системы пожаротушения и сигнализации, систему оповещения и управления эвакуацией людей при возникновении пожара не ниже второго типа, а также системы вентиляции для удаления дыма;
- контрольные точки, в которых будут фиксироваться значения опасных факторов пожара и расчетное время эвакуации, расположены непосредственно на путях эвакуации людей;
- моделирование сценариев пожара проведено с помощью дифференциальной модели.

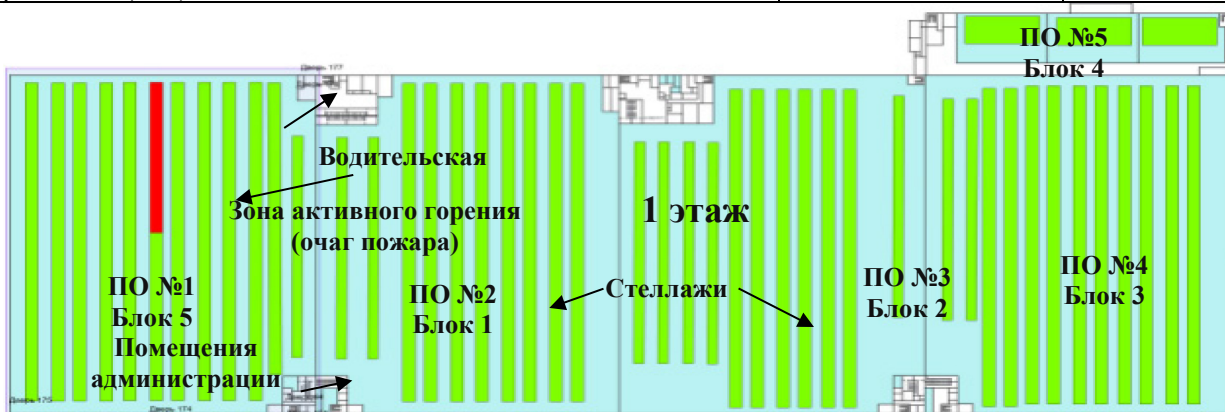
В табл. 1 представлены параметры, характеризующие пожарную нагрузку. Критическое время по каждому из опасных факторов пожара определяется как время достижения этим фактором предельно допустимого значения на путях эвакуации на высоте 1,7 м от пола. Критически допустимые показатели, определяющие опасные факторы пожара, установлены на следующих уровнях [14]:

- предел высокой температуры окружающей среды – 70 °С;
- интенсивность теплового излучения не должна превышать 1400 Вт/м<sup>2</sup>;
- минимальная дистанция видимости в задымленной среде – 20 м;
- концентрация кислорода в воздухе не должна опускаться ниже – 0,226 кг/м<sup>3</sup>;
- предельно допустимая концентрация токсичных газообразных веществ при горении: CO<sub>2</sub> - 0,11 кг/м<sup>3</sup>; CO - 1,16·10<sup>-3</sup> кг/м<sup>3</sup>; HCl - 23·10<sup>-6</sup> кг/м<sup>3</sup>.

При выполнении расчета проводилось моделирование динамики развития пожара в течение 590 с в пределах блока 5 (пожарного отсека №1) в различные моменты времени от начала возникновения пожара. Зона активного горения представлена на рис. 3.

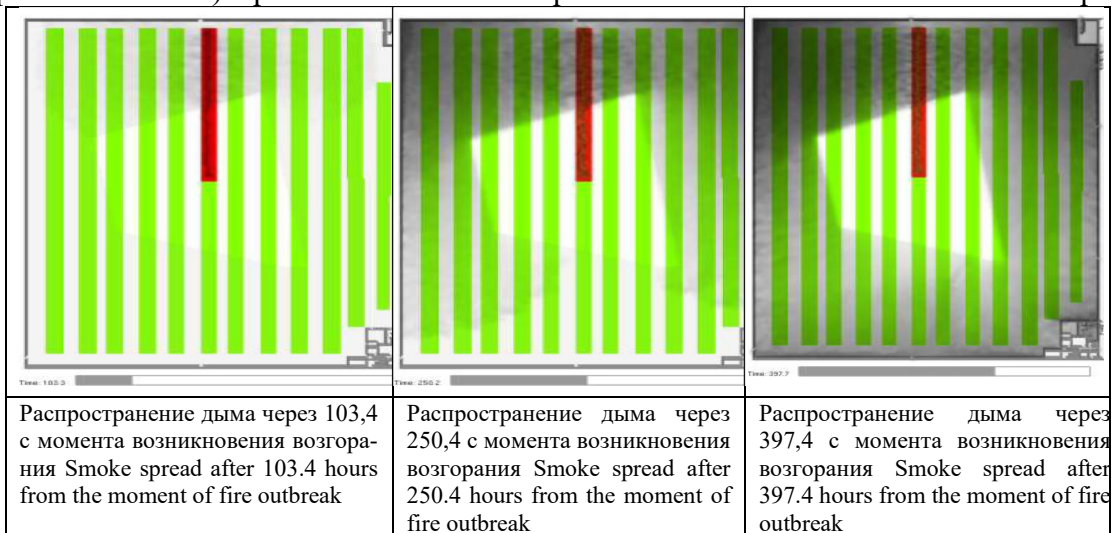
**Таблица 1. Параметры, характеризующие пожарную нагрузку**  
**Table 1. Parameters characterizing the fire load**

| Параметр Parameter   | Единица измерения Unit of measurement | Значение Value |
|--|---------------------------------------|----------------|
| Низшая теплота сгорания Net heating value  | кДж/кг                                | 14000          |
| Линейная скорость распространения пламени Linear flame velocity                            | м/с                                   | 0,042          |
| Удельная массовая скорость выгорания Specific mass burnout rate                            | кг/(м <sup>2</sup> · с)               | 0,0129         |
| Коэффициент полноты сгорания Combustion efficiency   | —                                     | 0,93           |
| Удельная мощность Specific power   | кВт/м <sup>2</sup>                    | 167,958        |
| Дымообразующая способность Smoke-forming capacity  | Нп · м <sup>2</sup> /кг               | 53             |
| Потребление кислорода (O <sub>2</sub> ) Oxygen consumption (O <sub>2</sub> )               | кг/кг                                 | 1,161          |
| Выделение углекислого газа (CO <sub>2</sub> ) Carbon dioxide production (CO <sub>2</sub> ) | кг/кг                                 | 0,642          |
| Выделение угарного газа (CO) Carbon monoxide production (CO)                               | кг/кг                                 | 0,0317         |
| Выделение хлористого водорода (HCl) Hydrogen chloride production (HCl)                     | кг/кг                                 | 0              |



**Рис. 3 – Пожарная модель**  
**Fig. 3 – Fire model**

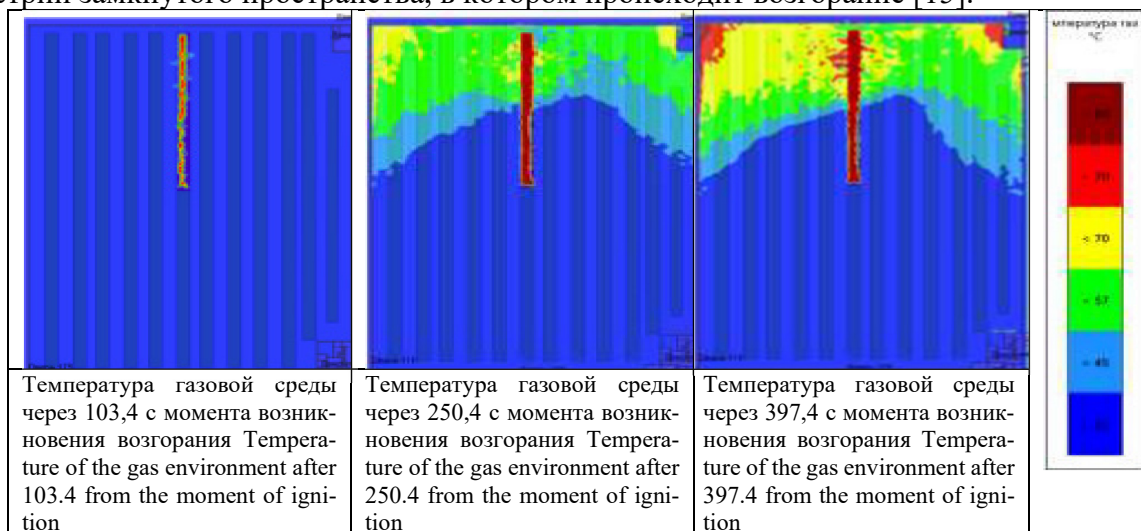
На рис. 4 продемонстрирована динамика распространения дыма в пределах блока 5 (пожарный отсек № 1) в различные моменты времени от начала возникновения пожара.



**Рис. 4 – Распространение дыма в блоке 5 (ПО №1) на разных промежутках времени**  
**Fig. 4 – Smoke spread in block 5 (PO No. 1) at different time intervals**

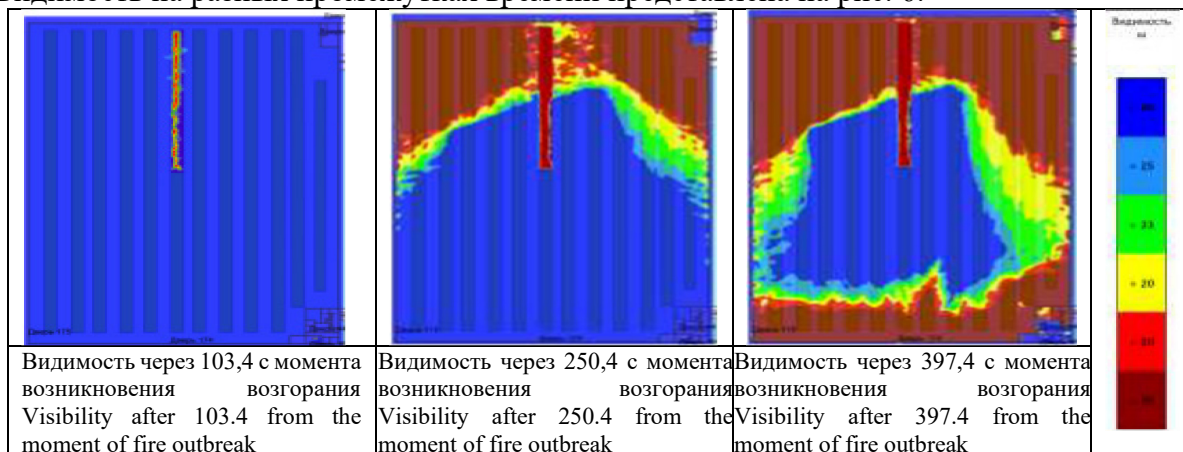
На 4 минуте пожара происходит значительное увеличение плотности дыма, что существенно затрудняет видимость и ориентирование в пространстве. Дым заполняет пространство блока 5, достигая соседние помещения. Температура в эпицентре пожара резко возрастает, что приводит к ускорению процесса пиролиза и усилению дымообразования. К шестой минуте после начала пожара задымление охватывает весь ПО №1, ограничивая возможность безопасной эвакуации. Концентрация токсичных веществ в дыме достигает опасных для жизни значений. Повышение температуры газов на разных промежутках времени

с момента возникновения возгорания представлено на рис. 5. Анализ представленных данных позволяет установить закономерности, характеризующие динамику нарастания температурных показателей на различных этапах развития пожара. Скорость повышения температуры, а также достигаемые максимальные значения, напрямую зависят от ряда факторов, в частности, от характеристик горючего материала, интенсивности притока кислорода и геометрии замкнутого пространства, в котором происходит возгорание [15].



**Рис. 5 – Повышение температуры газов в блоке 5 (ПО № 1) на разных промежутках времени**  
**Fig. 5 – Increase in gas temperature in block 5 (PO No. 1) at different intervals of time**

Видимость на разных промежутках времени представлена на рис. 6.



**Рис. 6 – Видимость в блоке 5 (ПО № 1) на разных промежутках времени с момента возникновения возгорания**

**Fig. 6 – Visibility in block 5 (PO No. 1) at different time intervals from the moment the fire started**

В первые минуты после возникновения возгорания в блоке 5 (ПО № 1) видимость снижается. Это обусловлено интенсивным выделением дыма, образующегося в результате термического разложения различных материалов, присутствующих в помещении. Дым быстро заполняет пространство, рассеивая свет и значительно снижая дальность видимости. В табл. 2 показано через какое время после начала пожара в блоке 5 (ПО № 1) достигаются предельно допустимые значения по каждому из опасных факторов пожара. Анализ этих данных позволяет установить критические временные интервалы для активации систем противопожарной защиты и эвакуации персонала. Временная задержка до достижения предельных значений по температуре и концентрации токсичных продуктов горения дает определенный запас для принятия мер по локализации пожара и минимизации ущерба. Однако, следует учитывать, что развитие пожара является динамическим процессом, и скорость нарастания опасных факторов может значительно увеличиваться при определенных условиях, таких как наличие легковоспламеняющихся материалов или нарушение работы систем вентиляции.

**Таблица 2. Время достижения критических параметров опасных факторов пожара в зоне 5 (ПО № 1)**

**Table 2. Time to reach critical parameters of hazardous fire factors in zone 5 (PO No. 1)**

| Помещение Premises                               | Температура газов (70°C)<br>Gas temperature | Видимость<br>Visibility | O <sub>2</sub> | CO <sub>2</sub> | CO  | HCl | Тепловой поток<br>Heat flow |
|--|---|-------------------------|----------------|-----------------|-----|-----|-----------------------------|
| Водительская Driver's room                       | 557   | 348,7                   | 487            | 493             | 501 | 515 | 549                         |
| Сортировочный центр<br>Sorting center            | >590  | 252,9                   | 459            | 465             | 476 | 496 | >590                        |
| Помещение администрации<br>Administrative office | >590  | 367,8                   | 502            | 518             | 526 | 535 | >590                        |

Временная задержка до достижения предельных значений по температуре и концентрации токсичных продуктов горения дает определенный запас для принятия мер по локализации пожара и минимизации ущерба. Однако, следует учитывать, что развитие пожара является динамическим процессом, и скорость нарастания опасных факторов может значительно увеличиваться при определенных условиях, таких как наличие легковоспламеняющихся материалов или нарушение работы систем вентиляции [15].

Результаты определения вероятности эвакуации по эвакуационным путям представлены в табл. 3. Анализ данных позволяет установить, что ключевым фактором, влияющим на успех эвакуации, является соответствие пропускной способности маршрутов потенциальному потоку эвакуируемых лиц. В случаях, когда пропускная способность значительно превышает ожидаемый поток, вероятность успешной эвакуации оценивается как высокая, что отражается в значениях, приближающихся к единице.

**Таблица 3. Значения вероятности эвакуации сотрудников**  
**Table 3. Employee evacuation probability values**

| Помещение<br>Premises                            | Время блокирования, тбл, с<br>Blocking time, | Необходимое время эвакуации, 0,8 тбл, с<br>Required evacuation time | Время начала эвакуации, тнэ, с<br>Evacuation start time | Время эвакуации, тэ = тнэ + тп, с<br>Evacuation time | Вероятность эвакуации по эвакуационным путям, Рэ.п.<br>Probability of evacuation along evacuation routes |
|--|--|---|---|--|--|
| Водительская Driver's room                       | >590   | >472  | 30,0  | 42,6   | 0,999  |
| Сортировочный центр<br>Sorting center            | 272,9  | 285,3   | 30,0  | 231,4  | 0,999  |
| Помещение администрации<br>Administrative office | 322,8  | 258,2   | 30,0  | 72,6   | 0,999  |

На рис. 7 представлен график, отображающий численность персонала, покинувшего блок 5 (ПО №1) в динамике относительно времени.



**Рис. 7 – График отображающий численность персонала, покинувшего блок 5 (ПО № 1) с момента возникновения возгорания**  
**Fig. 7 – Graph showing the number of personnel who left block 5 (PO No. 1) since the fire broke out**

Полученное графическое отображение иллюстрирует изменение числа эвакуированных из складского блока 5 в заданный период времени. Анализ графика позволяет получить представление об эффективности принятых мер по обеспечению безопасности и оперативной эвакуации персонала. Значения индивидуального риска для работника в блоке 5 (ПО № 1) представлены в табл. 4.

**Таблица 4. Значения рисков для сотрудника в блоке 5 (ПО № 1)**  
**Table 4. Risk values for an employee in block 5 (PO No. 1)**

| Профессия<br>Profession | Вероятность присутствия, $q_{im}$ ,<br>Probability of presence | Индивидуальный риск,<br>Individual risk $R_m$ , год <sup>-1</sup> |
|-------------------------|--|---|
| Сотрудник Employee      | $22,82 \cdot 10^{-3}$  | $5,522 \cdot 10^{-7}$   |

**Вывод.** Анализ расчетных данных продемонстрировал, что величина индивидуального пожарного риска остается в пределах допустимого нормативного значения при условии внедрения дополнительных мероприятий, направленных на повышение уровня противопожарной защиты, так как выполняется следующее условие [4]:

$$R_m^{max} = 0,5522 \cdot 10^{-6} \leq R_m^n = 10^{-6}$$

Оценка риска смертельного исхода в результате воздействия опасных факторов пожара проведена с учетом работоспособности систем противопожарной защиты, установленных на рассматриваемом объекте. Для обеспечения противопожарных мероприятий на складском комплексе необходимо выполнить дополнительные противопожарные мероприятия [2, 14, 15]:

1. Произвести разделение здания складского комплекса на пять отдельных пожарных отсеков посредством установки противопожарных стен первого типа.

2. При определении этажности здания учесть ярусы мезонина, площадь которых на любой отметке превышает 40% площади этажа здания. Мезонин организовать не более чем в 5 ярусов. Хранение на каждом уровне мезонина не предусматривать высокостеллажным более 5,5 метра.

3. Пожарный отсек разделить на пожарные секции площадью не более 10 400 м<sup>2</sup> одним из следующих способов или их комбинацией: противопожарными перегородками 1-го типа с повышенным пределом огнестойкости не менее EI 90 с противопожарным заполнением проемов.

4. Каждый ярус (уровень) мезонина оборудовать автоматическими установками пожаротушения и сигнализации, внутренним противопожарным водопроводом.

5. Подачу товаров и материалов на уровень хранения допускается предусматривать вертикальными подъемниками с ограждением из негорючих материалов с ненормируемым пределом огнестойкости (например, сетчатое ограждение), в том числе без шахт. Перемещение людей на данных подъемниках исключается.

6. В местах пересечения конвейерными линиями противопожарных стен (противопожарных перегородок), разделяющих пожарные отсеки (секции), проемы следует защищать одним из следующих способов: дренчерной завесой с оросителями, выполненной в одну нитку с каждой из сторон проема; противопожарными шторами с пределом огнестойкости не ниже EI60 с любой из сторон проема.

#### **Библиографический список:**

1. Вагин А.В., Гамаюнов Р.В., Моделирование опасных факторов пожара на объекте складского назначения // Вестник науки №12 (81) том 4, 2024. – С. 1990 - 1995.
2. Беляков Г. И. Пожарная безопасность: учебник для вузов / Г. И. Беляков. — 2-е изд. – М.: Издательство Юрайт, 2025. — 282 с.
3. Широков Ю.А. Пожарная безопасность на предприятии: Учебное пособие для вузов, 4-е изд., стер. | М.: Лань, 2025. — 364 с.
4. Федеральный закон «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» от 22.07.2008 г. №123-ФЗ.
5. ГОСТ 12.1.004-91. «Межгосударственный стандарт. Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. Общие требования». — М.: Стандартиформ, 2006. – 68 С.
6. Постановление Правительства Российской Федерации от 22 июля 2020 г. №1084 «О порядке проведения расчетов по оценке пожарного риска».
7. Применение полевого метода математического моделирования пожаров в помещениях: Методические рекомендации. – М.: ВНИИПО, 2003. – 35 С.
8. Приказ МЧС России № 533 от 26.06.2024 «Методика определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах».
9. Кошмаров Ю.А. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении: Учебное пособие. — М.:

Академия ГПС МВД России, 2000. – 118 С.

10. СП 505.1311500.2021 «Расчет пожарного риска. Требования к оформлению».
11. Пособие по применению «Методики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности». 2-ое изд., / А.А. Абашкин [и др.]. М.: ВНИИПО, 2014. – 226 с.
12. Глуханов А.С., Цаплин В.В. Расчетные величины пожарного риска при авариях на наружных газопроводах // Промышленное и гражданское строительство. – Москва: Издательство ПГС, Выпуск 5, 2022. – С. 50-54.
13. Беляков Г.И. Пожарная безопасность, безопасность в чрезвычайных ситуациях и оказание первой помощи: учебник для вузов / Г. И. Беляков. — 5-е изд. — М.: Издательство Юрайт, 2025. – 530 с.
14. Собурь С.В. Пожарная безопасность предприятия: курс пожарно-технического минимума: учебно-справочное пособие / С. В. Собурь. - 19-е изд., перераб. – М.: Издательство ПожКнига, 2021. – 201 с.
15. Горев В.А. Теория горения и взрыва: учебное пособие / М.: Московский государственный строительный университет, ЭБС АСВ, 2010. – 201 с.

#### References:

1. Vagin A.V., Gamayunov R.V., Modeling Fire Hazards at a Warehouse Facility. *Science Bulletin*. 2024;4(12 (81)): 1990-1995. (In Russ)
2. Belyakov G.I. Fire Safety: Textbook for Universities- 2nd ed. - Moscow: Yurait Publishing House, 2025: 282. (In Russ)
3. Shirokov Yu.A. Fire Safety at the Enterprise: Textbook for Universities, 4th ed., reprinted. Moscow: Lan, 2025: 364. (In Russ)
4. Federal Law "Technical Regulations on Fire Safety Requirements" dated July 22, 2008, No. 123-FZ.
5. GOST 12.1.004-91. "Interstate Standard. Occupational Safety Standards System. Fire Safety. General Requirements." Moscow: Standartinform, 2006: 68. (In Russ)
6. Resolution of the Government of the Russian Federation dated July 22, 2020, No. 1084 "On the Procedure for Conducting Fire Risk Assessment Calculations." (In Russ)
7. Application of the Field Method of Mathematical Modeling of Fires in Premises: Methodological Recommendations. Moscow: VNIPO, 2003: 35. (In Russ)
8. Order of the Ministry of Emergency Situations of Russia No. 533 dated June 26, 2024, "Methodology for Determining Fire Risk Estimates at Industrial Facilities." (In Russ)
9. Koshmarov Yu. A. Forecasting Fire Hazards in Premises: A Tutorial. Moscow: Academy of the GPS of the Ministry of Internal Affairs of Russia, 2000:118. (In Russ)
10. SP 505.1311500.2021 "Fire Risk Calculation. Design Requirements." (In Russ)
11. Manual for the Application of the "Methodology for Determining Calculated Fire Risk Values in Buildings, Structures, and Constructions of Various Functional Fire Hazard Classes." 2nd ed.. A.A. Abashkin et al. Moscow: VNIPO, 2014: 226. (In Russ)
12. Glukhanov A. S., Tsaplin V. V. Fire Risk Estimates in Accidents on External Gas Pipelines. *Industrial and Civil Engineering*. Moscow: PGS Publishing House, 2022;5: 50-54. (In Russ)
13. Belyakov G. I. Fire Safety, Safety in Emergencies, and First Aid: a textbook for universities. 5th ed. Moscow: Yurait Publishing House, 2025:530. (In Russ)
14. Sobur S. V. Fire Safety at an Enterprise: a Course in Fire-Technical Minimum: a textbook and reference manual. 19th ed., revised. — Moscow: PozhKniga Publishing House, 2021:201(In Russ)
15. Gorev V. A. Combustion and Explosion Theory: a textbook. Moscow: Moscow State University of Civil Engineering, EBS ASV, 2010: 201. (In Russ)

#### Сведения об авторе:

Александр Сергеевич Глуханов, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Техносферная безопасность»; [promo19\\_78@mail.ru](mailto:promo19_78@mail.ru); ORCID ID: 0000-0002-0897-8690.

#### Information about authors:

Alexander S. Glukhanov, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Assoc. Prof., Department of Technosphere Safety; [promo19\\_78@mail.ru](mailto:promo19_78@mail.ru); ORCID ID: 0000-0002-0897-8690.

#### Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/ Received 30.10.2025.

Одобрена после рецензирования /Revised 20.11.2025.

Принята в печать /Accepted for publication 25.11.2025.

**Применение алгоритмических процедур неточного вывода на основе нечетких знаний к решению прикладных задач**

**Н.В. Даценко<sup>1</sup>, Л.А. Коробова<sup>1</sup>, И.А. Матыцина<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Воронежский государственный университет инженерных технологий,  
394036, г. Воронеж, проспект Революции, д. 19, Россия,

<sup>2</sup>Воронежский филиал Государственного университета морского и речного флота  
имени адмирала С.О. Макарова,  
394033, г. Воронеж, Ленинский проспект, д. 174л. Россия

**Резюме. Цель.** Статья посвящена вопросам обобщения и применения математического аппарата нечеткой логики к практическим технологическим задачам, где требуется оценка нескольких альтернатив с последующим выбором. Цель работы заключается в разработке методики применения обобщенного подхода правил неточного вывода к решению разноплановых не связанным между собой профильным задачам. **Метод.** Применены алгоритмические процедуры к определенному спектру задач. **Результат.** Рассмотрены реальные процессы: проведение систематического контроля усвоения учебного материала с рекомендациями по изменению траектории обучения; отбор сотрудников при приеме на работу и выявление результатов профпригодности; определение качества готовой продукции на промышленном предприятии для повышения конкурентоспособности и т.д. Такой подход дает возможность применять один и тот же алгоритм для описания лингвистической неопределенности в различных областях исследования, опираясь на использование лингвистических переменных. Апробированы модели и методы теории нечетких множеств; представлен специфический инструментарий для описания объектов, которые не имеют четких и однозначных границ. **Вывод.** Доказана универсальность применяемого математического аппарата к решению многопрофильных задач.

**Ключевые слова:** принятие решений, функция принадлежности, лингвистическая переменная

**Для цитирования:** Н.В. Даценко, Л.А. Коробова, И.А. Матыцина. Применение алгоритмических процедур неточного вывода на основе нечетких знаний к решению прикладных задач. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025;52(4):73-82. DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-4-73-82.

**Application of algorithmic procedures of imprecise inference based on fuzzy knowledge to the solution of applied problems**

**N.V. Datsenko<sup>1</sup>, L. A. Korobova<sup>1</sup>, I.A. Matytsina<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Voronezh State University of Engineering Technologies,  
19 Revolution Ave., Voronezh 394036, Russia,

<sup>2</sup>Voronezh branch Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,  
174, 1 Leninsky Ave., Voronezh 394033, Russia

**Abstract. Objective.** This article explores the application of fuzzy logic to practical technological problems that require evaluating alternatives and then making a choice. The goal is to develop a methodology for applying a generalized approach to fuzzy inference rules to solving diverse, unrelated problems. **Method.** The application of algorithmic procedures to a specific range of problems is considered. **Result.** The following processes are considered: systematic monitoring of learning outcomes with recommendations for modifying learning paths; employee selection upon hiring and identifying professional suitability; determining the quality of finished products at an industrial enterprise to improve competitiveness, etc. This approach makes it

possible to apply the same algorithm to describe linguistic uncertainty in various research areas, relying on the use of linguistic variables. Models and methods of fuzzy set theory are tested, and specific tools for describing objects that do not have clear and unambiguous boundaries are presented. **Conclusion.** The universality of the applied mathematical apparatus for solving multidisciplinary problems is proven.

**Keywords:** decision making, membership function, linguistic variable

**For citation:** N.V. Datsenko, L. A. Korobova, I.A. Matytsina. Application of algorithmic procedures of imprecise inference based on fuzzy knowledge to the solution of applied problems. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2025; 52(4):73-82. (In Russ) DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-4-73-82.

**Введение.** Задача выбора из множества альтернатив является актуальной во многих сферах деятельности. Нельзя выделить наиболее востребованные и популярные разделы из теории принятия решения. Для разных сфер профессиональной деятельности специалисты применяют алгоритмические процедуры определенного спектра задач. В работах [1-3, 7] рассмотрены решения прикладных задач, где присутствует неопределенность действий или требуется выбор на множестве альтернатив. Их решение основано на применении алгоритмов теории риска, теории игр, теории нечетких множеств и др. Как правило, в задачах широкого спектра имеется четкая постановка и они поддаются понятной и сравнительно простой формализации. Для решения таких задач применимы методы линейного и динамического программирования [9, 11], методы сетевого планирования [13] и др.

Современные достижения науки и вычислительных технологий позволяют разрабатывать собственные инструменты, которые основаны на известных алгоритмах, значительно упрощающих процесс выбора оптимального варианта действий.

**Постановка задачи.** Модели и методы теории нечетких множеств предлагают специфический инструментарий для описания объектов, которые не имеют четких и однозначных границ. Эти методы позволяют формализовать нечеткие понятия, что способствует их дальнейшей обработке в соответствии с поставленной задачей.

Такой подход дает возможность применять один и тот же алгоритм для описания лингвистической неопределенности в различных областях исследования, опираясь на использование лингвистических переменных. Аналогично тому, как при физической неопределенности для формализации и описания процессов обработки информации используют матрицы и графы, теория нечетких множеств предоставляет средства для представления и обработки информации в условиях лингвистической неопределенности.

Сферы применения такого подхода различны, например, оценка качества выпускаемой продукции, тестирование сотрудников при приеме на работу или в процессе производственной деятельности, оценка освоения компетенций обучающимися в образовательных организациях и др. Кроме того, одной из особенностей указанных предметных областей является тот факт, что истинность некоторых высказываний не может быть установлена с определенностью, что приводит к необходимости применения процедур неточного вывода [4-6].

**Методы исследования.** В настоящей статье рассмотрена методология использования алгоритмических процедур неточного вывода, базирующихся на аппарате теории нечетких множеств, применительно к автоматизированной оценке уровня сформированности компетенций обучающихся, процессу отбора сотрудников при приеме на работу и анализу качества готовой продукции.

**Обсуждение результатов.** Приложение методологии алгоритмических процедур неточного вывода.

**1. Оценка уровня сформированности компетенций обучающихся.** В настоящее время в образовательных организациях помимо традиционных методов обучения широко используются методы, основанные на применении электронных образовательных ресурсов. Хотя электронное обучение обладает рядом преимуществ по сравнению с традиционными

методами, такими как интерактивность, доступность и гибкость, оно также сопряжено с рядом проблем. Одной из них является необходимость учета индивидуальных особенностей обучающихся, включая уровень их начальных знаний и способность воспринимать новую информацию [8].

Кроме того, важно проводить систематический фронтальный контроль уровня сформированности компетенций обучающихся, анализировать полученные результаты и при необходимости корректировать траекторию обучения. Одним из путей решения указанных проблем является разработка автоматизированной системы, позволяющей хранить большой объем информации, а также проводить регулярный контроль [14].

После изучения теоретического материала система проверяет сформированность компетенций с помощью тестирования. При этом пользователи, в зависимости от эрудированности в конкретной области, могут допускать и не допускать ошибки. Ошибки делятся на два класса: незначительные и серьезные или грубые. Степень влияния на итоговый результат незначительной ошибки - невысокая, грубая ошибка в итоговом результате отражается существенно. Следует также более объективно рассмотреть ситуацию, когда тестируемый дает неправильные ответы на простые вопросы и демонстрирует отличные результаты при решении заданий повышенной сложности.

Здесь следует учесть особенности ситуации, волнение и эмоциональность тестируемого. Т.е. сама задача выставления оценки за каждый ответ теста требует учета так называемого последствия оценивания. Поэтому для формализации оценивания уровня сформированности компетенций целесообразно применять процедуру неточного вывода на основе продукционных правил.

Использование продукционной модели обосновано возможностью применения правил вида «Если ..., то ...», что наилучшим образом подчеркивает логические выводы и процессы модификации знаний при оценке сформированности компетенций. База знаний автоматизированной системы (АС) обучения содержит два продукционных правила и четырех оценочных правил вывода, для получения численных значений коэффициентов уверенности и коэффициентов надежности [15. С. 273]. Продукционные правила вывода представлены в виде кортежа (1):

$$\langle p; L; \text{ЕСЛИ } A_1 \text{ и/или } \dots A_n, \text{ ТО } h_j; \text{МД}_p; \text{МНД}_p \rangle, \quad (1)$$

где  $p$  – имя продукции (ее номер в БЗ);  $L$  – сфера применения продукции (тема дисциплины);  $A = \{A_n\}$  – множество посылок,  $h = \{h_j\}$  – множество гипотез;  $\text{МД}_p$  и  $\text{МНД}_p$  – соответственно мера доверия и мера недоверия гипотезе  $h$ , выводимой из данной продукции, при условии истинности посылок [9].

Поскольку все задания в системе имеют разную степень сложности, свяжем с каждой посылкой коэффициент уверенности (КУ), а с каждой продукцией – коэффициент надежности (КН), выражающие соответственно большую (или меньшую) значимость посылки и продукции для итоговой оценки по изучаемой теме [14]. КН вычисляется следующим образом:

$$\text{КН}_p = \text{МД}_p - \text{МНД}_p, \quad (2)$$

Таким образом, выражение (1) примет вид:

$$\langle p; L; \text{ЕСЛИ } A_1(\text{КУ}_1) \text{ и/или } \dots A_n(\text{КУ}_n), \text{ ТО } h_j; \text{КН}_p \rangle, \quad (3)$$

Комбинированный КУ посылка вычисляется в зависимости от используемой в правиле логической операции: 1)  $A_1(\text{КУ}_1)$  И  $A_2(\text{КУ}_2)$ ,  $\text{КУ}_A = \min(\text{КУ}_1, \text{КУ}_2)$ ,

$$2) A_1(\text{КУ}_1) \text{ ИЛИ } A_2(\text{КУ}_2), \text{КУ}_A = \max(\text{КУ}_1, \text{КУ}_2),$$

Коэффициент уверенности гипотезы об уровне теоретических знаний обучающегося определяется следующим образом:

$$\text{КУ}_h = \text{КН}_p \cdot \text{КУ}_A. \quad (4)$$

Однако всесторонняя оценка сформированности компетенций должна учитывать не только результаты вышеуказанных тестов, но и уровень умений и навыков,

приобретенных в процессе выполнения практических заданий по дисциплине, при этом представляется целесообразным добавлять к общей оценке дополнительные баллы за нетривиальное и/или рациональное решение задач, а также за выполнение заданий в установленный согласно графику прохождения дисциплины срок [15. С. 275].

При итоговом оценивании уровня сформированности компетенций обучающегося по дисциплине преподаватели, как правило, пользуются рассуждениями вида: «ЕСЛИ уровень теоретических знаний высокий И уровень умений и навыков средний И получено небольшое количество бонусов за выполнение заданий в срок И получено малое количество бонусов за рациональное решение практических задач, ТО оценка студента по дисциплине – «хорошо».

Для формализации подобных рассуждений целесообразно применять продукционную модель, при этом значения критериев оценки имеют лингвистический характер.

С учетом терминологии, применяемой преподавателями при подобных рассуждениях, лингвистические переменные  $A_1$ =«уровень теоретических знаний» и  $A_2$ =«уровень умений и навыков» принимают значения  $V_{A_i}^1$ =«ниже порогового»,  $V_{A_i}^2$ =«пороговый»,  $V_{A_i}^3$ =«средний»,  $V_{A_i}^4$ =«высокий»;  $i = \overline{1,2}$ , а лингвистические переменные  $A_3$ =«количество бонусов за выполнение заданий в срок» и  $A_4$ =«количество бонусов за нетривиальное и/или рациональное решение практических задач» –  $V_{A_i}^5$ =«малое»,  $V_{A_i}^6$ =«среднее»,  $V_{A_i}^7$ =«большое»,  $i = \overline{3,4}$ .

Для обеспечения автоматизации процесса оценивания необходимо формализовать элементы терм-множеств указанных лингвистических переменных, например, путем построения их функций принадлежности (ФП).

При этом для формирования функций предлагается использовать метод групповой экспертизы, достоинством которого является то, что организованное взаимодействие между специалистами позволяет компенсировать смещение оценок отдельных членов группы, поскольку применение математических процедур для объединения полученных от экспертов данных обеспечивает построение более достоверной ФП, чем при ее формировании одним специалистом [10].

В связи с тем, что при оценке значений лингвистических переменных  $A_i$ ,  $i = \overline{1,4}$  преподаватели используют, например, понятия типа «уровень теоретических знаний, соответствующий пороговому значению, равен 50 баллам по результатам тестирования», построение ФП предлагается осуществлять с использованием методов экспертных оценок, позволяющих формализовать нечеткие числа, приблизительно равные некоторому четкому числу  $K$ .

Для этой цели предлагается использовать следующую функцию [16-17]:

$$\mu_k(x) = \exp^{-\sigma(K-x)^2}, \quad (5)$$

где  $\sigma$  зависит от требуемой степени нечеткости значения функции принадлежности  $\mu_k(x)$

$$\text{и определяется следующим образом: } \sigma = -4 \ln 0,5 / \beta^2 (K), \quad (6)$$

где  $\beta$  - расстояние между  $a$  и  $b$  (точками перехода для  $\mu_k(x)$ ), т.е. точками, в которых функция вида (5) принимает значение, равное 0,5).

Таким образом, задача построения  $\mu_k(x)$  для некоторого числа сводится к отысканию параметров  $a$  и  $b$ .

На основе проведенных статистических исследований о том, как эксперты представляют себе границы классов таких чисел, были получены сведения, представленные в табл. 1, где  $[y]$  - целая часть числа  $y$  [18. С. 46].

**Таблица 1. Расстояния между точками перехода согласно мнениям экспертов**  
**Table 1. Distances between transition points according to expert opinions**

| $y$                        | $\beta(y)$   |
|----------------------------|--|
| 1÷4, 6÷9                   | 0,46·y   |
| 10, 20, 30, 40, 60, 80, 90 | (0,357-0,00163·y)·y  |
| 35, 45, 55, 65, 75, 85, 95 | (0,213-0,00067·y)·y  |
| 5                          | 2,8  |
| 15                         | 6,48   |
| 25                         | 6,75   |
| 50                         | 24   |
| Прочие двузначные числа    | $\frac{1}{2} \cdot \left( \beta \cdot \left( \left[ \frac{y}{10} \right] \cdot 10 + 5 \right) + \beta \cdot \left( y - \left[ \frac{y}{10} \right] \cdot 10 \right) \right)$ |

Для построения функции принадлежности нечеткого множества, соответствующего приближенной точечной оценке, используется следующий алгоритм:

1. Вычисляется значение:  $d = q \bmod 3$ ,

(7)

где  $q$  - порядок младшей значащей цифры числа  $K$ ; отсюда получаем классы эквивалентности  $M_d \{d = 0,1,2\}$ .

2. Определяется  $\beta(K)$  следующим образом:

$$\text{При } K \in M_0: \quad y = r_q \cdot 10, \quad \beta(K) = \beta(y) \cdot 10^{q^2},$$

(8)

где  $r_q$  – младшая значащая цифра числа  $K$ ;  $\beta(y)$  находится из табл. 1.

При  $K \in M_1$ :

$$\text{а) если } r_{q+1} = 0, \text{ то } \quad y = r_q, \quad \beta(K) = \beta(y) \cdot 10^{q-1},$$

(9)

$$\text{б) если } r_{q+1} \neq 0, \text{ то } \quad y = r_{q+1} \cdot 10 + r_q, \quad \beta(K) = \beta(y) \cdot 10^{q-1}$$

(10)

При  $K \in M_2$ :

$$\text{а) если } r_{q+1} = 0, \text{ то } \quad y = r_q \cdot 10, \quad \beta(K) = \beta(y) \cdot 10^{q-2};$$

(11)

б) если  $r_{q+1} \neq 0$ , то значения  $y$  и  $\beta(y)$  определяем по формуле (10).

3. Полученное значение  $\beta(K)$  подставляется в выражение (6) и определяется величина  $\sigma$ .

4. Вычисляются значения степеней принадлежности по формуле (5).

Пусть, например, имеется приближенная точечная экспертная оценка «уровень теоретических знаний, соответствующий пороговому значению, равен 50 баллам по результатам тестирования». Тогда, согласно приведенному выше алгоритму,  $q=2$ ,  $r_2=5$ ,  $r_3=0$ , так как младшая значащая цифра числа  $K$  стоит в разряде десятков. Далее вычислим  $d = q \bmod 3 = 2$ .

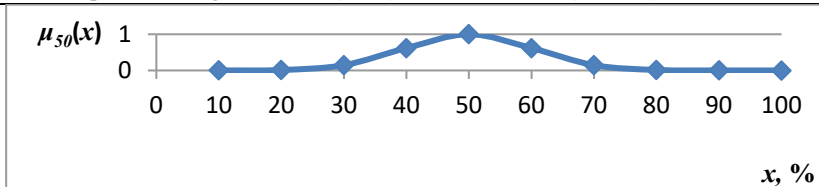
Следовательно, число  $K$  принадлежит к классу эквивалентности  $M_2$ , и так как  $r_3=0$ , то  $y = r_q \cdot 10 = 50$ ,  $\beta(K) = \beta(y) \cdot 10^{q-2} = 24 \cdot 10^0 = 24$ .

Значит,  $\sigma = -4 \ln 0,5 / 24^2 \approx 0,004814$ . Получим, что функция принадлежности, формализующая выше указанное нечеткое понятие, имеет вид  $\mu_{50}(x) = \exp^{-0,004814(50-x)^2}$ .

Вычислим значения степеней принадлежности указанной функции и получим следующее нечеткое множество:

$$S(V_{A_1}^2) = \left\{ \langle \mu_k(x) / x \rangle = \left\{ 5,9 \cdot 10^{-6} / 0; 0,0004 / 10; 0,013 / 20; 0,146 / 30; 0,618 / 40; 1,0 / 50; 0,618 / 60; 0,146 / 70; 0,013 / 80; 0,0004 / 90; 5,9 \cdot 10^{-6} / 100 \right\} \right\}$$

График полученной функции принадлежности представлен на рис.1.



**Рис. 1 – Функция принадлежности нечеткого понятия «уровень теоретических знаний, соответствующий пороговому значению, равен 50 баллам по результатам тестирования»**  
**Fig. 1 – Membership function of the fuzzy concept “the level of theoretical knowledge corresponding to the threshold value is equal to 50 points based on the testing results”**

Предложенный алгоритм позволяет формализовать критерии оценки успеваемости, которые впоследствии могут быть использованы в производственной модели для автоматизации процесса определения уровня сформированности компетенций [18]. В итоге, на основе полученной информации, система выдает соответствующие рекомендации. При высоком уровне освоения компетенции АС обучения предлагает испытуемому для изучения темы повышенной сложности. Если тестируемый при оценивании показывает прежние результаты или более низкие, то АС обучения предлагает повторить изучение текущего материала, в особенности те темы, вопросы по которым вызвали затруднение [11-12].

**2. Отбор сотрудников при приеме на работу.** Методология на основе нечеткой логики является инновационной и эффективной стратегией, которая позволяет учитывать множество различных факторов и обеспечить оптимальное сопоставление между требованиями вакансии и качествами кандидата. В зависимости от сферы применения методология принципов может быть одинакова, а набор критериев для оценки претендентов различным. Особенность использования методологии будет также заключаться в учете важности каждого критерия и учете приоритета более значимых качеств и навыков [19]. Такой подход способствует объективному оцениванию кандидатов без влияния человеческого фактора.

Сформулируем предварительные действия, которые необходимо выполнить перед началом процедуры оценки сотрудников. Прежде всего, необходимо разработать опросный лист с набором критериев ( $KR_i, i = 1, \dots, n$ ). Критерии должны учитывать все нюансы специфики работы предприятия ( $SRP$ ) и способности ( $SPK$ ) и навыки ( $NK$ ) претендента. Тогда критерий отбора можно представить в виде кортежа (12)

$$KR = \langle NSP, SPK, NK \rangle, \quad (12)$$

где  $KR$  – критерий отбора сотрудника;  $NSP$  – специфика работы предприятия;  $SRK$  – способности кандидата;  $NK$  – навыки кандидата.

Важно чтобы критерии отбора включали такие параметры, как профессиональные навыки, личностные качества, опыт работы и образование. Каждому из этих критериев приписывается определенная важность или весовой коэффициент, отражающий их относительную значимость. Чтобы при описании критерия учесть все указанные требования, используем лингвистическую переменную. Переменная будет включать имя (критерий отбора), набор оцениваемых показателей (список зависит от требований к должности), терм-множества оценки каждого показателя из набора. Здесь следует остановиться чуть подробнее, т.к. оценки различных показателей из набора могут быть качественно различны [13]. Например, могут применять для оценки три словесных термина «низкий», «средний», «высокий» или «нет», «может быть», «да». Обобщив эти оценки, будем использовать термины «оценка 1» -  $c_1$ , «оценка 2» -  $c_2$ , «оценка 3» -  $c_3$ . При таком описании функция принадлежности имеет вид (13):

$$\mu(x) = \begin{cases} 1 - \frac{c - x}{c_1 - c}, & \text{если } c \leq x \leq c_1 & \text{оценка 1;} \\ 1, & \text{если } c_1 \leq x \leq c_2 & \text{оценка 2;} \\ 0, & \text{если иначе} & \text{оценка 3.} \end{cases} \quad (13)$$

Формально функцию оценки критерия представим следующим образом (14):

$$O_{KR} = O_K(NSP_j, SPK_k, NK_l), \quad (14)$$

где  $O_{KR}$  – оценка критерия отбора сотрудника;  $O_K$  – оценка компетентности по отношению к специфике работы предприятия ( $NSP_j, j = 1 \dots J$ ), способности кандидата ( $SPK_k, k = 1 \dots K$ ), навыки кандидата ( $NK_l, l = 1 \dots L$ ). Значение оценки критерия в зависимости от используемой в правиле логической операции будет определяться следующим образом:

- 1)  $O_{K1}(NSP_j)$  И  $O_{K2}(SPK_k)$  И  $O_{K3}(NK_l)$ ,  $O_{KR} = \min(NSP_j, SPK_k, NK_l)$
- 2)  $O_{K1}(NSP_j)$  ИЛИ  $O_{K2}(SPK_k)$  ИЛИ  $O_{K3}(NK_l)$ ,  $O_{KR} = \max(NSP_j, SPK_k, NK_l)$ .

Данные процедуры наглядно демонстрируют различные степени соответствия между требованиями вакансии и качествами кандидатов. Эти переменные могут быть определены как низкий, средний и высокий уровни соответствия для каждого критерия [19].

С помощью математических алгоритмов и формул, производим комбинирование и агрегирование лингвистических переменных, что позволяет получить итоговую оценку соответствия каждого кандидата требованиям вакансии. Эта оценка может быть выражена в виде числовых значений от 0 до 1. Основным преимуществом методологии отбора на основе нечеткой логики является возможность учесть важность каждого критерия и дать приоритет более значимым качествам и навыкам. Данный подход способствует справедливому оцениванию кандидатов, основываясь на объективных критериях и учете неопределенности и комплексности [20].

**3. Анализ качества готовой продукции.** При производстве пищевых продуктов особое внимание уделяется качеству. Для успешного существования и конкуренции на современном рынке важно, чтобы качество вспомогательных приборов соответствовало высоким стандартам. Контроль качества осуществляется отделом технического контроля (ОТК), который отвечает за проверку выпускаемой продукции и минимизацию отклонений в технологии её изготовления. В ОТК также осуществляется отбраковка некачественной готовой продукции [21. С. 350].

Качество производимой продукции является одной из ключевых характеристик, существенно влияющих на формирование потребительских предпочтений и конкурентоспособности. Показатели качества представляют собой количественное (числовое) и качественное (словесное) выражение свойств товара [12]. Для оценки критерия «качество готовой продукции» (KGP) используется лингвистическая переменная с определённым набором характеристик (15):

$$KGP = \langle R, V, G, S, L, D1, D2 \rangle, \quad (15)$$

где  $KGP$  – комплексный критерий «качество готовой продукции»;  $R, V, G, S$  – показатели качественного (словесного) выражения свойств продукции;  $L, D1, D2$  – показатели количественного (численного) выражения свойств продукции.

Свойства из набора качественных (словесных) показателей определяется нечёткой переменной. Например, ( $Nperem, X1, R(Nperem, r)$ ), где  $Nperem$  – название свойства,  $X1$  – значение свойства в интервале от 0 до 1,  $R(Nperem, r)$  – нечеткое подмножество, описываемое качеством проявления свойства в оцениваемом критерии. Нечеткое подмножество в дискретном случае имеет вид  $R(Nperem, r) = r / (\mu_{perem}(r))$ . Свойства из набора количественных (численных) показателей оцениваются в своем диапазоне измерений и имеют свои допуски (отклонения). Для возможности их оценки в диапазоне качественных показателей от 0 до 1 необходимо приведение значений численных показателей к безразмерной величине. Для этого разделим каждое значение соответствующего параметра и его допуска на само значение параметра. Теперь каждое значение приведено к одной шкале. Теперь каждый численный показатель имеет диапазон изменения от  $1 - \Delta$  до  $1 + \Delta$ , с соответствующим индексом. На основе сформулированных синтаксических правил для каждого показателя свойства готовой продукции проводим композицию (объединение) полученных функций принадлежности  $\mu(r) = \max(\mu_i(r))$ , где  $\mu(r)$  – функция принадлежности итогового нечеткого множества,  $\mu_i(r)$  – функции принадлежности соответствующих показателей качества готовой продукции;  $i = 1 \dots N$  – количество свойств оценки готовой продукции. Итоговое синтаксическое правило определения качества готовой продукции имеет следующий вид:

### Правило 1.

ЕСЛИ  $Nperem_1 = 1$  И  $Nperem_2 = 1$  И  $Nperem_3 = 1$  И ... И  $1 - \Delta_i \leq perem_i \leq 1 + \Delta_i$  И  
... ТОГДА "Готовая продукция качественная"

### Правило 2.

ЕСЛИ  $Nperem_1 = 1$  И  $Nperem_2 = 1$  И  $Nperem_3 = 1$  И ... И  $0,5 \leq perem_i \leq 1$  И ... И  
 $1 - \Delta \leq perem_i \leq 1 + \Delta$  И ... ТОГДА "Готовая продукция рекомендована для для повторной пере-  
работки" ИНАЧЕ "Качество готовой продукции - низкое, продукция непригодна к использова-  
нию".

По полученным правилам проведено сопоставление степеней принадлежности рассматриваемых свойств показателей качества готовой продукции к нечетким подмножествам «Готовая продукция качественная», «Готовая продукция рекомендована для повторной переработки» и «Качество готовой продукции – низкое, продукция непригодна к использованию» [21. С. 352].

**Вывод.** В рамках данного исследования продемонстрировано решение трех профильных задач. Предложен подход к их решению с использованием нечеткой логики. Для каждой задачи представлен алгоритм и получены выводы. Для учебного процесса доказана необходимость учета индивидуальных особенностей обучающихся и последующая корректировка заданий. В двух производственных задачах представлена методология отбора сотрудников и определения качества готовой продукции. Во всех трех случаях использованы модели на основе нечеткой логики. Это доказывает, что применяемые алгоритмы являются эффективным инструментом, позволяющим лучше учесть множество факторов при принятии решений, и является справедливым и объективным подходом, который помогает выбрать наиболее подходящее решение.

### Библиографический список:

1. Болотова, Л.С. Системы поддержки принятия решений в 2 ч. Часть 2: учебник и практикум для вузов / Л.С. Болотова; ответственные редакторы В. Н. Волкова, Э. С. Болотов. — Москва: Издательство Юрайт, 2023. — 250 с. — (Высшее образование). — ISBN 978-5-9916-8251-0. — Текст: электронный // Образовательная платформа Юрайт — URL: <https://urait.ru/bcode/513142> (дата обращения: 14.05.2025)
2. Даценко, Н.В. Повышение эффективности формирования компетенций в области информационных технологий с использованием адаптивной автоматизированной обучающей системы / Н.В. Даценко, С.А. Горбатенко, В.В. Горбатенко // Проблемы преподавания математики, физики, химии и информатики в вузе и средней школе (ППМФХИ-VII) : Материалы VII региональной научно-методической конференции, Воронеж, 24 апреля 2021 года. – Воронеж: Воронежский государственный университет инженерных технологий, 2021. – С. 74-76.
3. Вербин, С.В. Наука принятия решений / С.В. Вербин. СПб., Питер, 2012. 241 с.
4. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / Под ред. Д.А. Поспелова. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. – 312 с.
5. Нечеткие множества и теория возможностей: Пер. с англ./под ред. Р.Р. Ягера. – М.: Радио и связь, 1986. – 408 с.
6. Даценко, Н.В. Адаптивная автоматизированная система как средство дифференциации обучения при подготовке специалистов в области информационных технологий / Н.В. Даценко, С.А. Горбатенко, В.В. Горбатенко // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2019. – Т. 7, № 2(25). – С. 382-390. – DOI 10.26102/2310-6018/2019.25.2.007.
7. Герчикова, И.Н. Процесс принятия и реализации управленческих решений / И.Н. Герчикова // Менеджмент в России и за рубежом. – 2003. № 12. С. 39–42.
8. Даценко, Н. В. Алгоритмическая процедура неточного вывода для аттестации студентов в адаптивной автоматизированной системе обучения ИТ-дисциплинам// Материалы LXI отчетной научной конференции преподавателей и научных сотрудников ВГУИТ за 2022 год : В 3 ч., Воронеж, 08–09 февраля 2023 года. – Воронеж: Воронежский государственный университет инженерных технологий, 2023. – С. 34-36.
9. Сутягина Н.И. Метод динамического программирования при принятии микроэкономического решения // Вестник НГИЭИ. 2014. № 11 (42). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metod-dinamicheskogo-programmirovaniya-pri-prinyatii-mikroekonomicheskogo-resheniya> (дата обращения: 14.05.2025). Кулик С.Д. Теория принятия решений (элементы теории проверки вероятных гипотез): учебное пособие. — М.: МИФИ, 2007.—152с.

10. Даценко, Н.В. Разработка информационного обеспечения автоматизированной системы обучения дисциплине "Информатика" / Н. В. Даценко // Общественная безопасность, законность и правопорядок в III тысячелетии. – 2018. – № 4-2. – С. 28-31.
11. Чадаев, К.В. Решение задач динамического программирования сетевыми методами// Информатика, вычислительная техника и управление. – 2022. № 1. <https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=http://nauteh-journal.ru/files/700b5a07-a4e3-49ad-8db8-398b163221b8&ved=2ahUKewjP-> (дата обращения: 14.05.2025)
12. Борисов А.Н. Обработка нечеткой информации в системах принятия решений / А.Н. Борисов, А.В. Алексеев, Г.В. Меркурьева и др. – М.: Радио и связь, 1989. – 304 с.
13. Вентцель Е.С. Исследование операций: задачи, принципы, методология. М.: Высшая школа, 2001.—208 с.
14. Даценко, Н.В. Применение неточного вывода для аттестации студентов в адаптивной автоматизированной системе обучения ИТ-дисциплинам / Н.В. Даценко, С.А. Горбатенко, В.В. Горбатенко, Г.В. Горбатенко // Образование и право. - № 9. - 2022. - С. 255-260.
15. Даценко, Н.В. Формализация критериев оценивания академической успеваемости обучающихся в дистанционном формате / Н.В. Даценко, С.А. Горбатенко, В. В. Горбатенко // Моделирование энергоинформационных процессов, Воронеж: Воронежский государственный университет инженерных технологий, 2023. – С. 271-277.
16. Борисов, А.Н. Обработка нечеткой информации в системах принятия решений / А.Н. Борисов, А.В. Алексеев, Г.В. Меркурьева и др. – М.: Радио и связь, 1989. – 304 с.
17. Орловский С.А. Проблемы принятия решений при нечеткой исходной информации / С.А. Орловский. – М.: Наука, 1981. – 208 с.
18. Даценко, Н.В. Использование автоматизированной системы для повышения качества подготовки специалистов гуманитарного профиля / Н.В. Даценко // Процессы информационного обмена в деятельности правоохранительных органов: современное состояние и перспективы совершенствования. Сборник научных статей. – Орел, 2015. – С. 46-48.
19. Матыгина, И.А. Методология отбора сотрудника на основе нечеткой логики / И.А. Матыгина, Л.А. Коробова // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – № 11. – С. 451-456. –EDN RHPFWY.
20. Поротикова, Е.С. Пригодность персонала для выполнения задач в проектных организациях / Е.С. Поротикова, Л.А. Коробова, И.А. Матыгина // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении: сборник научных статей Всероссийской конференции, Брянск, 22 мая 2023 года. – Курск: ЗАО «Университетская книга», 2023. – С. 108-114. – EDN LYKNZV.
21. Коробова, Л.А. Анализ качества фильтров тонкой очистки молока / Л.А. Коробова, И.А. Матыгина, Е.С. Прачева // Моделирование энергоинформационных процессов, Воронеж: Воронежский государственный университет инженерных технологий, 2023. – С. 349-354. – EDN NEYRTF.

#### References:

1. Bolotova, L.S. Decision support systems in 2 parts. Part 2: textbook and practical course for universities / L.S. Bolotova; editors-in-chief V. N. Volkova, E. S. Bolotov. - Moscow: Yurait Publishing House, 2023. - 250 p. - (Higher education). - ISBN 978-5-9916-8251-0. — Text: electronic // Educational platform Urayt — URL: <https://urait.ru/bcode/513142> (date of access: 14.05.2025)
2. Datsenko, N.V. Improving the efficiency of forming competencies in the field of information technology using an adaptive automated training system / N.V. Datsenko, S.A. Gorbatenko, V.V. Gorbatenko // Problems of teaching mathematics, physics, chemistry and computer science in universities and secondary schools (PPMFHI-VII): Proceedings of the VII regional scientific and methodological conference, Voronezh, April 24, 2021. - *Voronezh State University of Engineering Technologies*, 2021;74-76.
3. Verbin, S.V. Science of decision-making / S.V. Verbin. St. Petersburg, Piter, 2012. 241 p.
4. Fuzzy Sets in Control Models and Artificial Intelligence / Ed. by D.A. Pospelov. - M.: Nauka. Chief Ed. of Phys.-Math. Literature, 1986. - 312 p.
5. Fuzzy Sets and Possibility Theory: Trans. from English / Ed. by R.R. Yager. - M.: Radio and Communications, 1986. - 408 p.
6. Datsenko, N.V. Adaptive Automated System as a Means of Differentiating Training in the Training of Specialists in the Field of Information Technology / N.V. Datsenko, S.A. Gorbatenko, V.V. Gorbatenko. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2019; 7(2 (25)):382-390. – DOI 10.26102/2310-6018/2019.25.2.007.
7. Gerchikova, I.N. The process of making and implementing management decisions. *Management in Russia and Abroad*. 2003;12: 39-42.
8. Datsenko, N.V. Algorithmic procedure for inaccurate inference for student certification in an adaptive automated system for teaching IT disciplines// Proceedings of the LXI reporting scientific conference of teachers and researchers of VSUET for 2022: In 3 parts, Voronezh, February 08-09, 2023. - *Voronezh State University of Engineering Technologies*, 2023; 34-36.

9. Sutyagina N.I. Dynamic programming method for making microeconomic decisions // Bulletin of NGIEI. 2014. No. 11 (42). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metod-dinamicheskogo-programmirovaniya-pri-prinyatii-mikroekonomicheskogo-resheniya> (date of access: 14.05.2025). Kulik S.D. Decision-making theory (elements of the theory of testing probable hypotheses): textbook. - М.: МЭФТИ, 2007. - 152 p.
10. Datsenko, N. V. Development of information support for an automated teaching system for the discipline "Computer Science" *Public safety, legality and law and order in the III millennium*. 2018; 4-2:28-31.
11. Chaadaev, K.V. Solving dynamic programming problems using network methods// Computer Science, Computer Engineering and Management. - 2022. No. 1. URL: <https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=http://nauteh-journal.ru/files/700b5a07-a4e3-49ad-8db8-398b163221b8&ved=2ahUKewjP-> (дата обращения: 14.05.2025)
12. Borisov A.N. Processing of fuzzy information in decision-making systems / A.N. Borisov, A.V. Alekseev, G.V. Merkurieva, et al. - М.: Radio and Communications, 1989. - 304 p.
13. Venttsel E.S. Operations Research: Tasks, Principles, Methodology. - М.: Higher School, 2001.-208 p.
14. Datsenko, N.V. Application of Inaccurate Inference for Certification of Students in an Adaptive Automated System for Teaching IT Disciplines / N.V. Datsenko, S.A. Gorbatenko, V.V. Gorbatenko, G.V. Gorbatenko. *Education and Law*. 2022; 9: 255-260.
15. Datsenko, N.V. Formalization of criteria for assessing the academic performance of students in a distance learning format / N.V. Datsenko, S.A. Gorbatenko, V.V. Gorbatenko // *Modeling of energy-information processes*, Voronezh: Voronezh State University of Engineering Technologies, 2023; 271-277.
16. Borisov, A.N. Processing fuzzy information in decision-making systems / A.N. Borisov, A.V. Alekseev, G.V. Merkurieva et al. - Moscow: Radio and Communications, 1989. - 304 p.
17. Orlovsky S.A. Problems of decision-making with fuzzy initial information. Moscow: Science, 1981:208.
18. Datsenko, N.V. Using an automated system to improve the quality of training specialists in the humanities / N.V. Datsenko // *Information exchange processes in the activities of law enforcement agencies: current state and prospects for improvement*. Collection of scientific articles. - Orel, 2015: 46-48.
19. Matytsina, I.A. Methodology for selecting an employee based on fuzzy logic / I.A. Matytsina, L.A. Korobova. *Bulletin of Tula State University. Technical sciences*. 2023;11: 451-456. -EDN RHPFWY.
20. Porotikova, E.S. Personnel suitability for performing tasks in design organizations / E.S. Porotikova, L.A. Korobova, I.A. Matytsina // *Automation and modeling in design and management: collection of scientific articles of the All-Russian conference, Bryansk, May 22, 2023*. - Kursk: ZAO "Universitetskaya kniga", 2023. - Pp. 108-114. - EDN LYKNZV.
21. Korobova, L.A. Analysis of the quality of fine milk filters / L.A. Korobova, I.A. Matytsina, E.S. Pracheva. *Modeling of energy-information processes*, Voronezh: Voronezh State University of Engineering Technologies, 2023; 349-354. - EDN NEYRTF.

#### **Информация об авторах:**

Даценко Наталия Валерьевна, доцент, кандидат технических наук, доцент кафедры информационных технологий, моделирования и управления: [natdatsenko@mail.ru](mailto:natdatsenko@mail.ru)

Коробова Людмила Анатольевна, доцент, кандидат технических наук, доцент кафедры информационных технологий, моделирования и управления: [Lyudmila\\_korobova@mail.ru](mailto:Lyudmila_korobova@mail.ru)

Матыцина Ирина Александровна, кандидат технических наук, доцент кафедры математики, информационных систем и технологий: [irina210390@mail.ru](mailto:irina210390@mail.ru)

#### **Information about the authors:**

Natalia V. Datsenko, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Assoc. Prof., Department of Information Technologies, Modeling and Management: [natdatsenko@mail.ru](mailto:natdatsenko@mail.ru)

Lyudmila A. Korobova, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Assoc. Prof., Department of Information Technologies, Modeling and Management: [Lyudmila\\_korobova@mail.ru](mailto:Lyudmila_korobova@mail.ru)

Irina A. Matytsina Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Department of Mathematics, information systems and technologies: [irina210390@mail.ru](mailto:irina210390@mail.ru)

#### **Конфликт интересов/Conflict of interest.**

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

**Поступила в редакцию/ Received 10.10.2025.**

**Одобрена после рецензирования /Reviced 07.11.2025.**

**Принята в печать /Accepted for publication 10.11.2025.**

**Анализ структурного сходства в оценке качества изображений**  
**А.Н. Земцов, М.А. Кузнецов, Гайс Мохаммед Салех Аль-Мерри**  
Волгоградский государственный технический университет,  
400005, г. Волгоград, пр. имени В.И. Ленина, 28, Россия

**Резюме. Цель.** Цель работы состоит в исследовании недостатков распространенных в настоящее время объективных математических критериев, основанных на принципе измерения вносимой ошибки, а также демонстрации преимуществ критериев, учитывающих особенности зрительной системы человека. **Метод.** Исследование основано на моделировании внесения искажений импульсным шумом. Полученное качество изображения оценивается с применением вышеуказанных метрик. Метрики оценки качества должны хорошо согласовываться с результатами субъективных оценок для широкого класса изображений, не требуя при этом чересчур сложных вычислений; имели простую аналитическую форму и их можно было бы применять в качестве критериев оптимальности при оптимизации или выборе параметров систем обработки изображений, в том числе, систем машинного обучения. **Результат.** Результаты экспериментов показывают слабую сторону традиционных подходов к оценке качества изображения, основанных на использовании математических мер, оценивающих вносимую алгоритмом обработки ошибку. **Вывод.** Метрики представляют собой распространенные в настоящее время объективные критерии, с помощью которых можно измерить отклонения, но они плохо коррелируют с субъективными показателями качества. Метрики, учитывающие особенности зрительной системы человека, позволяют оценивать качество изображения как измерение структурных искажений, а не вносимых ошибок. Проведенные нами эксперименты позволили показать, что улучшенная метрика имеет не линейную, а показательную зависимость от вероятности искажения значения пикселя, значительно лучше коррелирует с субъективным визуальным восприятием качества изображения, подвергнутого обработке, чем среднеквадратическое отклонение.

**Ключевые слова:** среднеквадратическое отклонение, индекс структурного сходства, оценка качества изображений, зрительная система, кодирование изображений

**Для цитирования:** А.Н. Земцов, М.А. Кузнецов, Гайс Мохаммед Салех Аль-Мерри. Анализ структурного сходства в оценке качества изображений. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025;52(4):83-90. DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-4-83-90.

**Analysis of Structural Similarity for Image Quality Assessment**  
**A.N. Zemtsov, M.A. Kuznetsov, Ghaith Mohammed Saleh Al-Merri**  
Volgograd State Technical University,  
28 Lenin Ave., Volgograd 400005, Russia

**Abstract. Objective.** The aim of the work is to study the shortcomings of currently widespread objective mathematical criteria based on the principle of measuring the introduced error, as well as to demonstrate the advantages of criteria that take into account the features of the human visual system. **Method.** The study is based on modeling the introduction of distortions by impulse noise. The resulting image quality is assessed using the above metrics. Quality assessment metrics should be consistent with subjective assessment results for a wide range of images without requiring complex computations; they should have a simple analytical form and be applicable as optimality criteria for optimizing or selecting parameters for image processing systems, including machine learning systems. **Result.** The experimental results show the weakness of traditional approaches to image quality assessment based on the use of mathematical measures that assess the

error introduced by the processing algorithm. **Conclusion.** These metrics are currently widespread objective criteria that can be used to measure deviations, but they correlate poorly with subjective quality indicators. Metrics that take into account the peculiarities of the human visual system allow us to evaluate image quality as a measurement of structural distortions, rather than introduced errors. Our experiments have shown that the improved metric has a non-linear but exponential dependence on the probability of pixel value distortion, and correlates much better with the subjective visual perception of the quality of the image that has been processed than the standard deviation.

**Keywords:** mean squared error, structural similarity, image quality assessment, human visual system, image coding

**For citation:** A.N. Zemtsov, M.A. Kuznetsov, Ghaith Mohammed Saleh Al-Merri. Analysis of Structural Similarity in Image Quality Assessment. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2025;52(4):83-90. (In Russ) DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-4-83-90.

**Введение.** В современных телекоммуникационных и вычислительных системах на различных этапах их функционирования, в изображения вносятся множество искажений различного рода. Требования к характеристикам изображений постоянно растут, в результате чего необходимость хранения и передачи огромных объемов данных требует использования различных алгоритмов кодирования изображений во многих областях, от медицины [1] до аэрокосмической промышленности [2]. С увеличением частоты и многообразия кибератак возникла острая необходимость в обеспечении защиты графической информации, как криптографической, так и стеганографической [3, 4], а также скремблирования [5, 6].

В последние годы было разработано много эффективных методов кодирования [7, 8] и защиты изображений со значительно отличающимися характеристиками, в том числе, для операций с потерями качества. Оценка методов без внесения искажений обычно является простой и понятной задачей, где используется ряд стандартных критериев, таких как коэффициент сжатия, время обработки и т.д.

Метрики оценки искажений должны хорошо согласовываться с результатами субъективных оценок для широкого спектра изображений, не обладая при этом большой вычислительной сложностью. Кроме того, желательно, чтобы используемые метрики оценки искажений имели простую аналитическую форму и их можно было бы применять в качестве критериев оптимальности при оптимизации или выборе параметров систем обработки изображений, в том числе, для машинного обучения [9].

Основной проблемой при оценке методов кодирования и защиты изображений, вносящих изменения в изображение, является чрезвычайная сложность описания типа и степени деградации в реконструируемых изображениях, которые описываются с использованием эталонного изображения, в качестве которого, обычно, выбирается исходное.

В силу особенностей человеческой зрительной системы понятие качества изображения и его показатели носят субъективный характер, что обуславливает интерес к разработке количественных метрик, которые можно было бы использовать для оценки вносимых алгоритмом обработки искажений [10]. Существует достаточно большой набор таких метрик: максимальное отклонение, среднее отклонение, взаимнокорреляционная функция, коэффициент битовых ошибок, среднеквадратическое отклонение, пиковое отношение сигнала к шуму, и другие. Эти метрики представляют собой распространенные объективные критерии, с помощью которых можно измерить отклонения от идеальных или совершенных моделей, но они плохо коррелируют с субъективными показателями качества. Как следствие, в последние годы основное внимание уделяется более глубокому анализу зрительной системы человека. Зрительная система человека слишком сложна для полного понимания, но учет даже упрощенной модели в объективных показателях приводит к лучшей корреляции с оценками экспертов.

**Постановка задачи.** Метод оценки качества изображения используется для измерения степени деградации реконструируемого изображения по отношению к его исходной версии. Субъективная оценка характеризуется трудоемкостью, большими временными, и, соответственно, финансовыми затратами при реализации. Под цифровым изображением будем понимать некоторое дискретное поле  $f_{ij}$ , или матрицу значений размером  $m \times n$ .

$$f_{ij} = f(x_i, y_j)$$

Таким образом, исходное изображение – матрица фиксированных значений  $f(x, y)$  взятых в фиксированных точках  $(x_i, y_j)$ , т.е.  $f(x_i, y_j)$  – значение пикселей исходного изображения, взятого в качестве эталона, а  $\hat{f}(x_i, y_j)$  – изображения, полученного в результате обработки исходного.

Объективные метрики оценки качества изображения, такие как среднеквадратическое отклонение и пиковое отношение сигнала к шуму, просты в использовании, понятны в физическом смысле, и удобны для математической реализации на этапах, связанных с оптимизацией. Для оценки изменений можно использовать среднеквадратическое отклонение [12]:

$$\text{СКО} = \frac{1}{m \cdot n} \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{m-1} |f(x_i, y_j) - \hat{f}(x_i, y_j)|^2$$

Среднеквадратическое отклонение является наиболее популярной метрикой для решения многих задач, в том числе, задач машинного обучения. Большее значение среднеквадратического отклонения соответствует большей степени деградации изображения в результате обработки.

В ряде случаев, подобные математические метрики не очень хорошо коррелируют с субъективным визуальным восприятием качества изображения, подвергнувшегося обработке. В связи с этим необходимо провести исследование чувствительности метрик среднеквадратического отклонения и индекса структурного сходства к вносимым искажениям и корреляции метрик с субъективным визуальным восприятием качества изображения.

**Методы исследования.** Основная идея индекса структурного сходства основывается на восприятии – предположении, что человеческая зрительная система в значительной степени соответствует принципу структурной похожести [13]. В соответствии с этим принципом деградация изображения, получаемого в результате обработки, рассматривается как изменение восприятия структуры изображения, а также его яркости и контрастности. Структурная информация определяется исходя из принципа пространственной локальности, т.е. располагающиеся поблизости и сильно связанные друг с другом. Индекс структурного сходства также относится к полным эталонным метрикам.

Итоговое значение метрики индекса структурного сходства представляет собой функцию яркости, контрастности и структурной похожести:

$$\text{ИСС}(x, y) = f(\varphi_{\text{я}}(x, y), \varphi_{\text{к}}(x, y), \varphi_{\text{с}}(x, y))$$

где  $\varphi_{\text{я}}(x, y)$  – показатель сравнения яркости (интенсивности) двух изображений,  $\varphi_{\text{к}}(x, y)$  – показатель сравнения контрастности, т.е. самой яркой и самой темной областями двух изображений,  $\varphi_{\text{с}}(x, y)$  – показатель структурного сходства локальных шаблонов яркости двух изображений для нахождения сходства и различия между ними.

Показатель яркости изображения получается произведением освещенности и отражательной способности, но показатели структурного сходства объектов на изображении не зависят от освещенности. Контрастность и структурная информация с точки зрения зрительной системы человека могут быть более важными, чем яркость.

Функции сравнения яркости контрастности структурного сходства могут быть записаны так:

$$\varphi_{\text{я}}(x, y) = \frac{2 \cdot \mu_f \cdot \mu_{\hat{f}} + C_1}{\mu_f^2 + \mu_{\hat{f}}^2 + C_1}$$

$$\varphi_k(x, y) = \frac{2 \cdot \sigma_f \cdot \sigma_{\hat{f}} + C_2}{\sigma_f^2 + \sigma_{\hat{f}}^2 + C_2}$$

$$\varphi_c(x, y) = \frac{\sigma_f \hat{f} + C_3}{\sigma_f \cdot \sigma_{\hat{f}} + C_3}$$

Здесь  $\mu_f$  и  $\mu_{\hat{f}}$  – значения средней яркости,  $\sigma_f$  и  $\sigma_{\hat{f}}$  – значения контрастности изображений  $f(x_i, y_j)$  и  $\hat{f}(x_i, y_j)$ .

Тогда итоговое значение метрики индекса структурного сходства запишется в виде:

$$\text{ИСС}(x, y) = \frac{(2 \cdot \mu_f \cdot \mu_{\hat{f}} + C_1) \cdot (2 \cdot \sigma_f \hat{f} + C_2)}{(\mu_f^2 + \mu_{\hat{f}}^2 + C_1) \cdot (\sigma_f^2 + \sigma_{\hat{f}}^2 + C_2)}$$

**Обсуждение результатов.** Изображения обычно искажаются на этапах их получения и передачи. Во многих задачах требуется обеспечить управляемый уровень искажений [14]. Существующие метрики качества изображения можно разделить на две категории: субъективные и объективные. Среднеквадратическое отклонение является наиболее популярной объективной метрикой для решения широкого спектра задач, таких как сжатие изображений [15], стеганография [16], машинное обучение [17, 18], и др. Во многих подобных задачах используемый алгоритм изменяет изображение. Так, например, целью сжатия изображений с потерями является эффективное хранение данных изображения путем снижения избыточности содержимого изображения, которая достигается отбрасыванием маловажной информации при сохранении требуемого уровня качества изображения [19].

Таким образом, требуется найти компромисс, который в примере с сжатием изображений с потерями заключается в соответствии количества бит, необходимых для представления изображения качеству полученного в результате сжатия изображения [20, 21].

К сожалению, близость между сжатым и исходным изображениями не является только объективной мерой, поскольку человеческое восприятие также играет важную роль в определении качества сжатого изображения. В связи с этим необходимо провести исследование с целью выявить недостатки математических мер оценки качества искаженных изображений.

Одним из наиболее частых результатов воздействия внешней среды на получаемое или передаваемое по каналам связи изображение, оказывающих существенное негативное влияние на качество изображения, является импульсный шум.

Импульсный шум для изображения с динамическим диапазоном  $[n_{min}, n_{max}]$  определим следующим выражением:

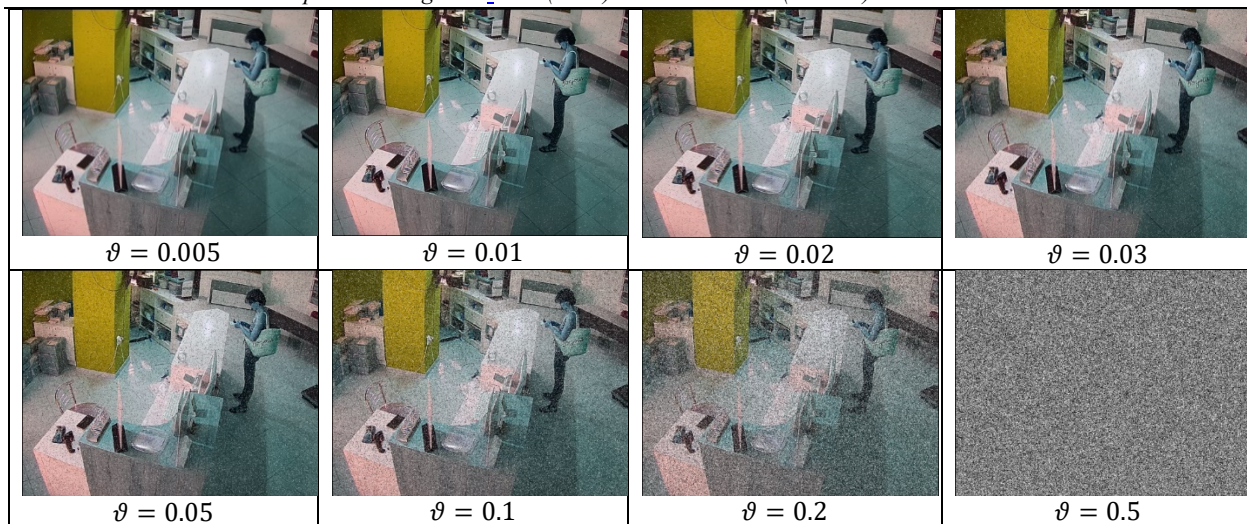
$$\hat{f}(x_i, y_j) = \begin{cases} f(x_i, y_j), & 1 - \vartheta, \\ \eta(x_i, y_j), & \vartheta, \end{cases}$$

где  $\vartheta$  – вероятность искажения значения пикселя  $(x_i, y_j)$ ,  $\eta(x_i, y_j)$  – искаженное значение пикселя  $(x_i, y_j)$ ,  $\eta(x_i, y_j) \in \{n_{min}, n_{max}\}$ . По умолчанию будем считать, что  $n_{min} = 0, n_{max} = 255$ .

Моделирование внесения искажений проводилось в общей сложности для 134 эталонных изображений в формате JPEG, включая 27 изображений в формате JPEG2000 [22].

Для проведения анализа на основе исходного изображения размером  $512 \times 512$  были сгенерированы изображения с импульсным шумом, некоторые из которых показаны на рис. 1.

Будем сравнивать эффективность оценки улучшенной метрики с математической метрикой, основанной на традиционном подходе к оценке качества изображения. Основная причина повышения эффективности при использовании улучшенной метрики заключается в том, что она обеспечивает в интегральном критерии оценку контраста и структурной информации в большей степени, чем яркости, что позволяет учесть важные особенности искаженного изображения и зрительной системы человека.

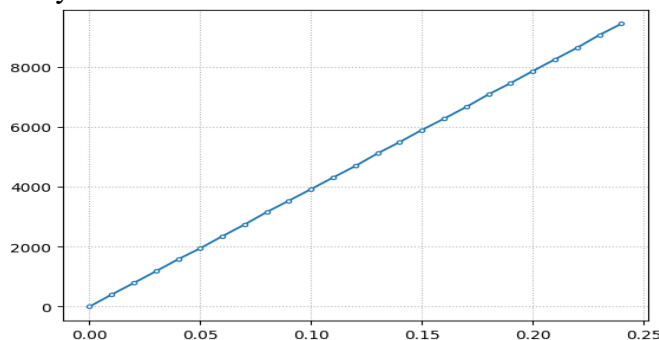


**Рис. 1 – Зашумленные изображения, используемые в эксперименте**

**Fig. 1 – Noisy images used in the experiment**

На первом этапе оценим эффективность метрики, основанной на традиционном подходе к оценке качества изображения.

Для этого будем последовательно увеличивать значения  $\vartheta$  и фиксировать вычисленные значения математической метрики. Вычисленные значения среднеквадратического отклонения для линейно увеличиваемых значений  $\vartheta$  с шагом 0.01 показаны на рис. 2.



**Рис. 2 – Зависимость среднеквадратического отклонения от  $\vartheta$**

**Fig. 2 – Dependence of mean squared error on  $\vartheta$**

На графике (рис. 2) видно, что при отсутствии искажений в результирующем изображении среднеквадратическое отклонение равно нулю. С линейным увеличением значений  $\vartheta$  линейно возрастает и среднеквадратическое отклонение.

Таким образом, среднеквадратическое отклонение не коррелирует с субъективным визуальным восприятием качества изображения. Это можно объяснить тем, что среднеквадратическое отклонение вычисляется путем сложения квадратичной разницы отдельных пикселей без учета связи между соседними пикселями.

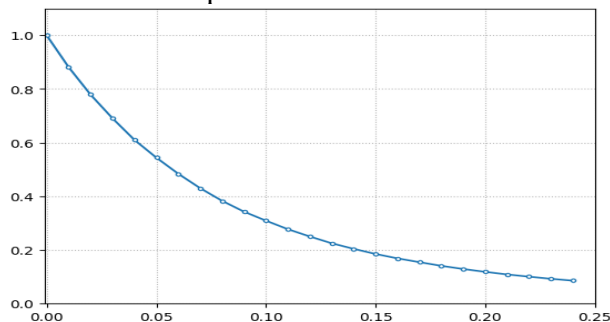
Большинство оценок визуального качества используют шкалы оценок для измерения воспринимаемого качества изображения. В таких случаях необходима экспертная помощь в установлении шкал качества и сравнении сжатых изображений и набора обучающих изображений. С помощью такого подхода сложно получить объективные и количественные показатели, т.к. полученные результаты субъективны и имеют качественный характер.

Зрительная система человека является конечным получателем информации от систем обработки изображений, поэтому наиболее правильным методом количественной оценки качества изображения может представляться субъективная оценка. Однако на практике субъективная оценка требует организации пула наблюдателей для маркировки искаженных изображений, что является трудоёмким, сложно организуемым и дорогостоящим процессом.

На втором этапе оценим эффективность улучшенной метрики, основанной на подходе к оценке структурной схожести. Для вычисления улучшенной метрики изображение

разбивается на неперекрывающиеся блоки  $8 \times 8$ , для которых вычисляются значения средней яркости и контрастности.

Вычисленные значения индекса структурного сходства для линейно увеличиваемых значений  $\vartheta$  с шагом 0.01 показаны на рис. 3.



**Рис. 3 – Зависимость индекса структурного сходства от  $\vartheta$**   
**Fig. 3 – Dependence of the structural similarity index on  $\vartheta$**

Видно, что отсутствию искажений в результирующем изображении значение индекса структурного сходства равно единице. С линейным увеличением значений  $\vartheta$  индекс структурного сходства убывает по показательному закону, и с разрушением изображения интенсивность изменений менее выражена.

Индекс структурного сходства значительно лучше коррелирует с субъективным визуальным восприятием качества изображения, подвергнутого обработке, чем среднеквадратическое отклонение. Это можно объяснить тем, что данная метрика основывается на предположении, что зрительная система человека в значительной степени адаптирована для извлечения структурной информации из поля зрения.

Общий вид зависимости корреляции от степени искажений исходного изображения одинаков: чем выше доля искажений  $\vartheta$  исходного изображения, тем меньше корреляция, и в большей степени эти искажения фиксируются каждой метрикой, но характер влияния идентичных искажений на метрики существенно отличается.

**Вывод.** Оценка вносимых алгоритмом обработки искажений играет очень важную роль в приложениях цифровой обработки изображений. В работе анализируются среднеквадратическое отклонение и индекс структурного сходства. Были проведены эксперименты по моделированию искажений импульсным шумом. Полученное качество изображения оценивается с применением вышеуказанных метрик.

Результаты показывают слабую сторону традиционных подходов к оценке качества изображения, основанных на использовании математических мер, оценивающих вносимую алгоритмом обработки ошибку. Эти метрики представляют собой распространенные в настоящее время объективные критерии, с помощью которых можно измерить отклонения, но они плохо коррелируют с субъективными показателями качества.

Как следствие, в последние годы основное внимание уделяется более глубокому анализу зрительной системы человека. Метрики, учитывающие особенности зрительной системы человека, позволяют оценивать качество изображения как измерение структурных искажений, а не вносимых ошибок.

Человеческий глаз очень чувствителен к изменению яркости или границам на изображении, а контраст и структура могут быть более важной информацией, чем яркость для зашумленного изображения.

Проведенные нами эксперименты позволили показать, что улучшенная метрика имеет не линейную, а показательную зависимость от вероятности искажения значения пикселя, значительно лучше коррелирует с субъективным визуальным восприятием качества изображения, подвергнутого обработке, чем среднеквадратическое отклонение.

#### Библиографический список:

1. Marias K. The Constantly Evolving Role of Medical Image Processing in Oncology: From Traditional Medical Image Processing to Imaging Biomarkers and Radiomics // Journal of Imaging, 2021. 7(8). 124.

2. Zhang J., Chen Z., Liu S. Remote Sensing Image Coding for Machines on Semantic Segmentation via Contrastive Learning // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2024. vol. 62. pp. 1-13. 5645013.
3. Коржик В.И., Красов А.В. Цифровая стеганография: учебник. М.: ООО «КноРус». 2023. 324 с.
4. Земцов А.Н. Методы цифровой стеганографии для защиты авторских прав: монография. Saarbrücken: LAP Lambert, 2012. 148 с.
5. Бахрушина Г. И. Скремблирование цифровых изображений / Г.И. Бахрушина, Д.С. Синьков, А.П. Бахрушин // *Ученые заметки ТОГУ*, 2018. Т. 9, № 1. С. 636-645.
6. Земцов А.Н., Цыбанов В.Ю. Скремблирование цифровых изображений // *Инженерный вестник Дона*, 2020. № 6 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/N6y2020/6503](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N6y2020/6503).
7. Иванов А.В. Методы, алгоритмы и устройства кодирования и декодирования изображений. Санкт-Петербург: Издательско-полиграфическая ассоциация высших учебных заведений, 2019. 260 с.
8. Земцов А.Н. Представление изображений с помощью преобразования Ле Галла // *Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика*, 2018. № 43. С. 42-48.
9. Park K., Chae M., Cho J.H. Image Pre-Processing Method of Machine Learning for Edge Detection with Image Signal Processor Enhancement // *Micromachines*, 2021. 12(1), 73.
10. Сычев А.С. Безэталонный интегрально-мультипликативный показатель качества цифровых полутоновых изображений/А.С. Сычев, И.С. Холопов // *Цифровая обработка сигналов*, 2018. № 3. С. 49-55.
11. Сай С.В. Метрика искажений мелких структур компрессированных изображений // *Компьютерная оптика*, 2018. Т. 42. № 5. С. 829-837.
12. Непараметрический алгоритм автоматической классификации многомерных статистических данных большого объема и его применение / И.В. Зеньков, А.В. Лапко, В.А. Лапко [и др.] // *Компьютерная оптика*, 2021. Т. 45. № 2. С. 253-260.
13. Wang Z., Bovik A.C., Sheikh H.R., Simoncelli E.P. Image Quality Assessment: From Error Visibility to Structural Similarity // *IEEE Transactions on Image Processing*, 2004. 13(4). pp. 600-612.
14. Антоненко А.С. Оценка параметров QoS для бесперебойной работы IPTV // *T-Comm: Телекоммуникации и транспорт*, 2020. Т. 14. № 10. С. 33-38.
15. Земцов А.Н. Сравнительный анализ эффективности методов сжатия изображений на основе дискретного косинусного преобразования и фрактального кодирования//*Прикладная информатика*, 2011. № 4(34). С. 90-104.
16. Земцов А.Н. Защита от неправомерного использования графической информации в социальных сетях // *Современные наукоемкие технологии*, 2020. № 7. С. 51-56.
17. Jierula A., Wang S. Study on Accuracy Metrics for Evaluating the Predictions of Damage Locations in Deep Piles Using Artificial Neural Networks with Acoustic Emission Data // *Applied Sciences*, 2021. 11(5). 2314.
18. Schmid L., Roidl M., Kirchheim A. Comparing Statistical and Machine Learning Methods for Time Series Forecasting in Data-Driven Logistics – A Simulation Study // *Entropy*, 2025. 27(1). 25.
19. Гаврилов Д.А. Аппаратная реализация сжатия динамического диапазона цифровых изображений на ПЛИС Xilinx / Д.А. Гаврилов, А.В. Павлов, Д.Н. Щелкунов//*Журнал радиоэлектроники*, 2018. № 10. С. 16.
20. Старобинец Д.Ю. Автоматический выбор параметров сжатия изображений с потерями на основе инвариантных моментов при дистанционном зондировании Земли//*Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, 2017. Т. 14. № 5. С. 26-36.
21. Земцов А.Н. Сравнительный анализ эффективности методов сжатия изображений на основе дискретного косинусного преобразования и фрактального кодирования//*Прикладная информатика*, 2011. № 5(35). С. 77-84.
22. ISO/IEC 15444-1 ITU-T Rec. T. 800, Information Technology – JPEG 2000 Image Coding System: Core Coding System, 2019. 196 p.

#### References:

1. Marias K. The Constantly Evolving Role of Medical Image Processing in Oncology: From Traditional Medical Image Processing to Imaging Biomarkers and Radiomics. *Journal of Imaging*, 2021;7(8):124. (In Russ)
2. Zhang J., Chen Z., Liu S. Remote Sensing Image Coding for Machines on Semantic Segmentation via Contrastive Learning. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2024;62:1-13. 5645013.
3. Korzhik V.I., Krasov A.V. Digital Steganography: A Textbook. Moscow: OOO KnoRus. 2023:324 p.
4. Zemtsov A.N. Digital Steganography Methods for Copyright Protection: A Monograph. Saarbrücken: LAP Lambert, 2012:148 p.
5. Bakhrushina G. I. Scrambling Digital Images /G.I. Bakhrushina, D.S. Sinkov, A.P. Bakhrushin. *Scientific Notes of TNU*, 2018;9(1):636-645. (In Russ)
6. Zemtsov A.N., Tsybanov V. Yu. Scrambling Digital Images. *Engineering Bulletin of the Don*, 2020;6. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/N6y2020/6503](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N6y2020/6503). (In Russ)
7. Ivanov A.V. Methods, Algorithms, and Devices for Coding and Decoding Images. St. Petersburg: Publishing and Printing Association of Higher Educational Institutions, 2019: 260 p. (In Russ)

8. Zemtsov A.N. Image representation using the Le Gall transform. *Bulletin of Tomsk State University. Management, Computing and Information Science*, 2018; 43: 42-48. (In Russ)
9. Park K., Chae M., Cho J.H. Image Pre-Processing Method of Machine Learning for Edge Detection with Image Signal Processor Enhancement. *Micromachines*, 2021;12(1):73.
10. Sychev A.S. Reference-free integral-multiplicative quality indicator of digital halftone images/A.S. Sychev, I.S. Kholopov. *Digital signal processing*, 2018;3:49-55 (In Russ)
11. Sai S.V. Metric of distortions of fine structures in compressed images. *Computer Optics*, 2018; 42(5):829-837.
12. Nonparametric algorithm for automatic classification of large-volume multivariate statistical data and its application /I.V. Zenkov, A.V. Lapko, V.A. Lapko [et al.] *Computer Optics*, 2021;45(2): 253-260. (In Russ)
13. Wang Z., Bovik A.C., Sheikh H.R., Simoncelli E.P. Image Quality Assessment: From Error Visibility to Structural Similarity. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2004;3(4):600-612.
14. Antonenko A.S. Assessing QoS Parameters for Uninterrupted IPTV Operation. *T-Comm: Telecommunications and Transport*, 2020;14(10.):33-38. (In Russ)
15. Zemtsov A.N. Comparative Analysis of the Efficiency of Image Compression Methods Based on the Discrete Cosine Transform and Fractal Coding. *Applied Informatics*, 2011; 4(34): 90-104. (In Russ)
16. Zemtsov A.N. Protection against Unauthorized Use of Graphic Information in Social Networks. *Modern Science-Intensive Technologies*, 2020;7:51-56. (In Russ)
17. Jierula A., Wang S. Study on Accuracy Metrics for Evaluating the Predictions of Damage Locations in Deep Piles Using Artificial Neural Networks with Acoustic Emission Data. *Applied Sciences*, 2021;11(5). 2314.
18. Schmid L., Roidl M., Kirchheim A. Comparing Statistical and Machine Learning Methods for Time Series Forecasting in Data-Driven Logistics – A Simulation Study. *Entropy*, 2025;27(1). 25.
19. Gavrilov D.A. Hardware Implementation of Dynamic Range Compression of Digital Images on Xilinx FPGAs/D.A. Gavrilov, A.V. Pavlov, D.N. Shchelkunov. *Journal of Radio Electronics*, 2018;1016. (In Russ)
20. Starobinets D.Yu. Automatic selection of lossy image compression parameters based on invariant moments in Earth remote sensing. *Modern Problems of Earth Remote Sensing from Space*, 2017;14(5): 26-36.
21. Zemtsov A.N. Comparative analysis of the efficiency of image compression methods based on discrete cosine transform and fractal coding. *Applied Informatics*, 2011;5(35):77-84. (In Russ)
22. ISO/IEC 15444-1 ITU-T Rec. T. 800, Information Technology – JPEG 2000 Image Coding System: Core Coding System, 2019:196 p. (In Russ)

#### Сведения об авторах:

Земцов Андрей Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электронно-вычислительные машины и системы»; [azemtsow@mail.ru](mailto:azemtsow@mail.ru); ORCID 0000-0001-6430-3615

Михаил Андреевич Кузнецов, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электронно-вычислительные машины и системы»; [35km@mail.ru](mailto:35km@mail.ru); ORCID 0000-0001-5044-1427

Гайс Мохаммед Салех Аль-Мерри, кандидат технических наук, доцент, кафедра "Системы автоматизированного проектирования и поискового конструирования"; [gaismr2009@mail.ru](mailto:gaismr2009@mail.ru); ORCID 0000-0002-9171-6535

#### Information about the authors:

Andrey N. Zemtsov, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Assoc. Prof., Department of Electronic Computers and Systems, [azemtsow@mail.ru](mailto:azemtsow@mail.ru); ORCID 0000-0001-6430-3615

Mikhail A. Kuznetsov, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Assoc. Prof., Department of Electronic Computers and Systems, [35km@mail.ru](mailto:35km@mail.ru); ORCID 0000-0001-5044-1427

Gais Mohammed Saleh Al-Merri, Lecturer, Department of Computer-Aided Design and Search Engineering Systems, [gaismr2009@mail.ru](mailto:gaismr2009@mail.ru); ORCID 0000-0002-9171-6535

#### Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 24.08.2025.

Одобрена после рецензирования /Revised 17.09.2025.

Принята в печать/Accepted for publication 20.10.2025.

## Эмуляция атак на компьютерные сети и их обнаружение с помощью Python

А.П. Куликов, Е.А. Радаева, Д.О. Якупов

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики,  
443010, г. Самара, ул. Л. Толстого, д. 23, Россия

**Резюме. Цель.** В статье рассматриваются методы эмуляции сетевых атак на компьютерные сети с использованием языка программирования Python. Особое внимание уделяется атакам ARP-spoofing, DDoS-атаки и SQL-инъекции, а также различным способам их обнаружения и мониторинга. **Метод.** Для имитации атак используются библиотеки Python, такие как *scapy* для создания фальшивых ARP-ответов и выполнения атак типа ARP-spoofing, *requests* для эмуляции DDoS-атак, а также инструменты для SQL-инъекций, предназначенные для тестирования уязвимостей серверов и приложений. **Результат.** Приведены примеры кода, демонстрирующие реализацию атак, а также методы анализа сетевого трафика с целью выявления аномалий, вызванных атаками. Осуществлена визуализация полученных данных, что позволяет лучше понять воздействие атак на производительность сети и эффективность методов защиты. **Вывод.** Результаты предназначены для специалистов в области информационной безопасности, исследующих уязвимости компьютерных сетей, для разработчиков, занимающихся созданием систем защиты от внешних угроз, а также могут быть полезны в контексте разработки новых решений для защиты сетевых инфраструктур от разнообразных угроз.

**Ключевые слова:** ARP-spoofing, DDoS-атака, SQL-инъекция, Python, анализ трафика, эмуляция атак, безопасность сетей, скрипты безопасности, обнаружение аномалий

**Для цитирования:** А.П. Куликов, Е.А. Радаева, Д.О. Якупов. Эмуляция атак на компьютерные сети и их обнаружение с помощью Python. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025;52(4):91-98. DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-4-91-98.

## Emulating and Detecting Computer Network Attacks Using Python

A.P. Kulikov, E.A. Radaeva, D.O. Yakupov

Volga Region State University of Telecommunications and Informatics,  
23 L. Tolstoy Str., Samara, 443010, Russia

**Abstract. Objective.** Methods for emulating network attacks on computer networks using the Python programming language are discussed. Special attention is paid to such types of attacks as ARP-spoofing, DDoS attacks and SQL injections, as well as various ways to detect and monitor them. **Method.** Python libraries such as *scapy* for creating fake ARP responses and performing ARP spoofing attacks, *requests* for emulating DDoS attacks, and SQL injection tools for testing server and application vulnerabilities are used. **Result.** Code examples demonstrating attack implementation are provided, along with methods for analyzing network traffic to identify anomalies caused by these attacks. The obtained data was visualized. **Conclusion.** The results are intended for specialists studying the vulnerabilities of computer networks, for developers of systems for protection against external threats, and are useful in developing solutions for protection against various threats.

**Keywords:** ARP-spoofing, DDoS attack, SQL injection, Python, traffic analysis, attack emulation, network security, security scripts, anomaly detection

**For citation:** A.P. Kulikov, E.A. Radaeva, D.O. Yakupov. Emulating and Detecting Computer Network Attacks Using Python. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2025;52(4):91-98. (In Russ) DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-4-91-98.

**Введение.** Сетевые атаки представляют собой одну из самых серьезных угроз для информационной безопасности в современном цифровом мире. В условиях постоянного увеличения объема данных и глобализации интернета такие угрозы становятся всё более распространёнными и разнообразными. Современные сетевые атаки могут привести к серьезным последствиям: утрате конфиденциальности личных и корпоративных данных, нарушению доступности систем и ресурсов, а также к финансовым потерям. Наряду с развитием технологий защиты активно развиваются и технологии атак, что ставит перед специалистами по безопасности задачу своевременно выявлять уязвимости и предотвращать угрозы.

**Постановка задачи.** Одним из важнейших методов защиты является использование инструментов для мониторинга и анализа сетевого трафика, что позволяет не только обнаруживать атаки на ранней стадии, но и более эффективно реагировать на них. Однако для того чтобы создать надежную систему защиты, необходимо понимать, как именно функционируют эти угрозы, какие признаки могут свидетельствовать о нападении и какие методы могут быть использованы для минимизации рисков.

Эмуляция атак становится важной частью работы специалистов по безопасности, так как она позволяет исследовать механизмы работы различных типов угроз в контролируемых условиях. Это помогает не только протестировать системы защиты, но и получить более полное представление о возможных рисках и последствиях атак.

Язык программирования Python является одним из самых мощных инструментов для создания эмуляторов сетевых атак благодаря наличию широкого спектра библиотек, таких как *scapy* для манипулирования сетевыми пакетами и *requests* для выполнения различных типов HTTP-запросов. Python позволяет эффективно разрабатывать и реализовывать атакующие сценарии, а также анализировать данные сетевого трафика, выявляя аномалии, вызванные этими угрозами. В рамках данной статьи рассматриваются три распространённые атаки: ARP-spoofing, DDoS-атаки и SQL-инъекции. Для каждой из атак будут приведены примеры эмуляции с использованием Python, а также методы мониторинга и анализа сетевого трафика с целью выявления аномалий и оценки эффективности защитных механизмов. Эмуляция атак и их мониторинг с использованием Python предоставляет мощный инструмент для глубокой диагностики и тестирования уязвимостей сетевых систем, что способствует повышению их безопасности и устойчивости к внешним угрозам.

**Методы исследования.** Для достижения целей исследования была выбрана комплексная методология, включающая использование различных инструментов и библиотек Python для эмуляции сетевых атак и анализа сетевого трафика. Основной задачей является создание и анализ атак, таких как ARP-spoofing, DDoS-атаки и SQL-инъекции, а также мониторинг их воздействия на сервер и клиентскую часть системы. Для этого выбраны несколько популярных библиотек Python, каждая из которых имеет свои особенности и возможности. Первая библиотека - Scapy, которая представляет собой мощный инструмент для работы с сетевыми пакетами. Она позволяет не только анализировать, но и генерировать пакеты для различных типов атак, таких как ARP-spoofing и DDoS. Scapy предоставляет гибкие возможности для работы на низком уровне модели OSI, что делает её отличным выбором для эмуляции атак. Для выполнения более сложных задач, связанных с HTTP-запросами и уязвимостями на веб-сайтах, используется библиотека Requests. Эта библиотека помогает создавать различные запросы, включая те, которые могут эмулировать атаки типа SQL-инъекций, что позволяет оценить уязвимости веб-приложений и баз данных. Для работы с сетевыми соединениями на более низком уровне и анализа пакетов в реальном времени применяется стандартная библиотека Socket. Она предоставляет необходимые функции для получения и отправки сетевых пакетов, что полезно для мониторинга трафика и взаимодействия с сервером. Для визуализации результатов мониторинга и анализа сетевого трафика, а также для отображения данных о выполненных атаках используется библиотека Matplotlib и Seaborn. Эти библиотеки позволяют создавать графики и диаграммы, что помогает анализировать динамику сетевого трафика и выявлять аномалии. Эмуляция

атак включает несколько этапов, начиная от настройки целевого сервера и создания соответствующих уязвимостей, до генерации и отправки пакетов с целью симуляции атак. Например, ARP-spoofing реализуется через отправку ложных ARP-пакетов в сеть, что приводит к тому, что атакующий может перехватывать и модифицировать трафик между компьютерами. DDoS-атака, с другой стороны, эмулирует ситуацию, когда сервер получает огромное количество запросов, что может привести к его перегрузке и отказу в обслуживании. SQL-инъекция же эмулирует вставку вредоносных данных в запросы к базе данных, что может позволить атакующему получить доступ к конфиденциальной информации. В результате, после эмуляции атак, необходимо провести мониторинг сетевого трафика. С помощью Python можно собирать данные о всех запросах и ответах, поступающих на сервер, и анализировать их с помощью визуализаций, что поможет выявить аномалии, характерные для атак. В данной работе методология основывается на сочетании различных инструментов и подходов для создания и анализа сетевых атак, что позволяет комплексно оценить их влияние на сеть и серверные ресурсы. Серверная часть системы отвечает за обработку входящих запросов, а также за мониторинг и анализ сетевых атак, которые могут быть эмулированы с помощью клиентской части. Для реализации серверной части используется фреймворк **Flask**, который позволяет быстро создать простой веб-сервер с поддержкой различных уязвимостей, таких как SQL-инъекции, и анализировать их последствия. Был реализован базовый сервер с двумя основными маршрутами. Один маршрут будет предоставлять обычную домашнюю страницу, а второй - страницу, уязвимую к SQL-инъекциям.

```
from flask import Flask, request
app = Flask(__name__)
@app.route('/')
def home():
    return "Welcome to the vulnerable server!"
@app.route('/vulnerable_page', methods=['GET'])
def vulnerable_page():
    user_id = request.args.get('id')
    if user_id == "' OR '1'='1'; --":
        return "SQL Injection Successful!"
    return "You didn't exploit the vulnerability."
if __name__ == '__main__':
    app.run(host='0.0.0.0', port=5000)
```

Данный код создает сервер с двумя маршрутами: / — стандартная страница; /vulnerable\_page — страница, уязвимая к SQL-инъекции, где параметр id может быть использован для внедрения вредоносных запросов, если клиент отправит специфическую строку, такую как "' OR '1'='1'; --". Для анализа сетевого трафика и мониторинга попыток атак, сервер будет логировать все входящие запросы. Была использована встроенная функция before\_request в Flask для логирования каждого запроса.

```
import logging
logging.basicConfig(filename='server.log', level=logging.INFO)
@app.before_request
def log_request_info():
    logging.info(f"Request Info: {request.method} {request.url}")
```

Данный код записывает все запросы, поступающие на сервер, включая метод запроса и URL. Логи можно использовать для последующего анализа и выявления подозрительных действий, таких как попытки выполнения SQL-инъекций. Чтобы предотвратить SQL-инъекцию, необходимо использовать безопасные способы работы с базами данных. В данном примере была использована библиотека sqlite3 для подключения к базе данных, ниже отображены запросы.

```
import sqlite3
def get_user_data(user_id):
    conn = sqlite3.connect('database.db')
    cursor = conn.cursor()
    cursor.execute("SELECT * FROM users WHERE id = ?", (user_id,))
    result = cursor.fetchone()
```

```
conn.close()  
return result
```

Вместо прямого встраивания значений в SQL-запросы, были использованы подготовленные запросы, что исключает возможность выполнения вредоносного SQL-кода.

Во время проведения эксперимента может быть смоделирована DDoS-атака, для чего сервер должен быть подготовлен к обработке большого потока запросов. В Flask есть возможность создать сервер с ограничением на количество одновременных соединений, что позволяет наблюдать за поведением сервера при высоких нагрузках. Для того чтобы эмулировать такую ситуацию, был использован код для обработки многократных запросов. Однако важно помнить, что в реальной системе для борьбы с DDoS-атаками обычно используются специализированные решения, такие как балансировщики нагрузки и брандмауэры. Для мониторинга производительности сервера, были использованы дополнительные метрики, такие как время отклика и использование ресурсов. Flask поддерживает простую интеграцию с такими инструментами, как Flask-Profiler, для более детального отслеживания времени отклика.

```
pip install Flask-Profiler
```

После установки был реализован код для мониторинга времени выполнения запросов:

```
from flask_profiler import Profiler  
profiler = Profiler(app)
```

Данный инструмент поможет отслеживать время обработки каждого запроса и выявлять узкие места в производительности, которые могут быть вызваны атаками, например, при перегрузке сервера запросами. Чтобы запустить сервер, достаточно использовать команду: `python server.py`. Это позволит запустить сервер, который будет доступен на порту 5000. После можно будет взаимодействовать с сервером, эмулируя различные виды атак и наблюдая за его реакцией. В данном случае серверная часть системы будет представлять собой уязвимый веб-сервер, который поддается атакам, а также включает средства для логирования, мониторинга и анализа сетевых атак. Клиентская отвечает за эмуляцию различных типов атак, таких как SQL-инъекции, DDoS-атаки, и других видов вредоносных действий. Клиент будет отправлять запросы к серверу и анализировать отклик, чтобы оценить, как сервер реагирует на атаку. Для реализации этой части используется Python с библиотеками, такими как `requests` для отправки HTTP-запросов и `threading` для эмуляции DDoS-атак. Первым этапом является эмуляция SQL-инъекции на уязвимой странице `/vulnerable_page`. Клиент будет отправлять запросы с параметром `id`, содержащим вредоносные строки, такие как:

```
import requests  
url = 'http://127.0.0.1:5000/vulnerable_page?id='  
payload = "' OR '1'='1'; --"  
response = requests.get(url + payload)  
print(f"Response: {response.text}")
```

Этот код отправляет HTTP-запрос на сервер с вредоносным параметром `id`, который использует классическую технику SQL-инъекции. Если сервер уязвим, он отреагирует успешным выполнением атаки, вернув сообщение "SQL Injection Successful!".

Для создания DDoS-атаки на сервер, можно использовать многократные параллельные запросы. Данная задача была решена с помощью многозадачности в Python с использованием библиотеки `threading`. Данный подход позволяет отправить большое количество запросов за короткий промежуток времени, имитируя высокую нагрузку на сервер.

```
import requests  
import threading  
def send_ddos_request():  
url = 'http://127.0.0.1:5000/vulnerable_page?id=test'  
response = requests.get(url)  
print(f"Response: {response.status_code}")  
threads = []  
# запускаем 1000 потоков для атаки  
for i in range(1000):
```

```
t = threading.Thread(target=send_ddos_request)
threads.append(t)
t.start()
# ожидаем завершения всех потоков
for t in threads:
    t.join()
```

Этот код запускает 1000 параллельных потоков, каждый из которых отправляет GET-запрос на сервер, эмулируя атаку отказа в обслуживании (DDoS). Это позволяет оценить, как сервер справляется с большим количеством запросов. После отправки запросов клиент будет анализировать отклики от сервера. Для каждого запроса следует проверять статус код, содержимое ответа и другие параметры. Логи сервера, которые записываются на серверной части, помогут в дальнейшем проанализировать, как атакующие взаимодействуют с системой.

```
response = requests.get(url)
print(f'Status Code: {response.status_code}')
print(f'Response Text: {response.text}')
```

Здесь клиент отправляет запрос и записывает статус код и текст ответа, что позволяет наблюдать, как сервер реагирует на различные атаки. Кроме SQL-инъекций и DDoS-атак, клиент может использовать другие типы атак, например, перебор паролей (brute-force) на страницах с формами логина. Эти атаки можно эмулировать с помощью простых циклов, отправляющих множество различных комбинаций логинов и паролей. Пример для атаки на форму входа:

```
login_url = 'http://127.0.0.1:5000/login'
login_data = {'username': 'admin', 'password': 'password123'}
response = requests.post(login_url, data=login_data)
print(f'Login response: {response.text}')
```

Этот код отправляет данные для логина с фиксированными значениями для пользователя и пароля, что можно использовать для эмуляции атаки на форму авторизации.

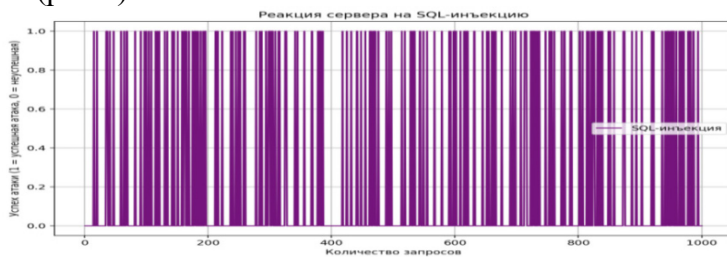
После выполнения атак клиент анализирует результаты, такие как статус код ответа (например, 200 — успешный запрос или 500 — ошибка сервера), а также содержимое ответа. Также важно собирать статистику о времени отклика, чтобы оценить, насколько быстро сервер справляется с запросами, особенно при DDoS-атаке.

```
import time
start_time = time.time()
response = requests.get(url)
end_time = time.time()
elapsed_time = end_time - start_time
print(f'Response Time: {elapsed_time} seconds')
```

Этот код позволяет измерять время отклика для каждого запроса, что важно для анализа производительности сервера, особенно при атаках, вызывающих перегрузку. В данном коде клиентская часть эмулирует атаки и собирает данные о реакции сервера на различные виды угроз. В дальнейшем эти данные будут использоваться для анализа и оптимизации методов защиты. Клиентская часть позволяет оценить, как сервер справляется с различными типами атак, а также помогает в разработке более эффективных защитных механизмов.

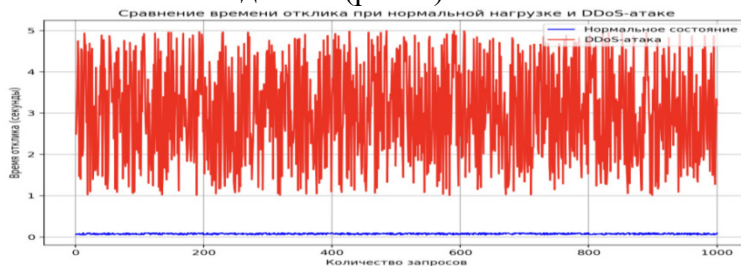
**Обсуждение результатов.** В данном разделе проводится анализ реакции сервера на различные атаки, эмулируемые с помощью клиентской части. Рассматриваются результаты выполнения SQL-инъекций, DDoS-атак, а также производительность сервера при различных условиях нагрузки. При отправке запроса с параметром, содержащим строку SQL-инъекции, сервер должен был вернуть ошибку или сообщение об успешной атаке. В данном случае сервер успешно обработал запрос с вредоносной строкой и вернул сообщение "SQL Injection Successful!", что указывает на наличие уязвимости. Важно отметить, что использование подготовленных запросов в коде сервера помогает предотвратить выполнение таких атак, исключая возможность манипуляции с базой данных. Это подтверждается тем,

что при отправке корректных запросов (не содержащих вредоносных данных) сервер вернул обычный ответ (рис.1).



**Рис. 1 – Реакция сервера на SQL-инъекцию**  
**Fig. 1 – Server response to SQL injection**

Во время эмуляции DDoS-атаки, когда было отправлено 1000 параллельных запросов, сервер начал испытывать замедление (рис. 2).



**Рис. 2 – Сравнение времени отклика при нормальной нагрузке и DDoS-атаке**  
**Fig. 2 – Comparison of response time under normal load and DDoS attack**

Время отклика значительно увеличилось, что свидетельствует о перегрузке серверных ресурсов. Также были замечены случаи, когда сервер не успевал обработать все запросы, что привело к появлению ошибок и отказу в обслуживании. Для борьбы с такими атаками следует внедрить механизмы балансировки нагрузки и использования кеширования, а также настроить защиту от DDoS с помощью сторонних сервисов. Время отклика на запросы, отправленные во время тестирования DDoS-атаки, увеличилось в несколько раз. Если при нормальной нагрузке время отклика составляло около 50-100 миллисекунд, то в условиях высокой нагрузки оно увеличилось до нескольких секунд. (рис. 3).



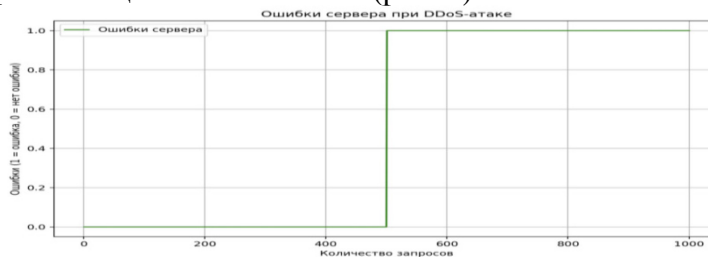
**Рис. 3 – Распределение времени отклика при DDoS-атаке**  
**Fig. 3 – Distribution of response time during a DDoS attack**

Это подтверждает необходимость оптимизации серверных процессов и внедрения механизмов защиты от перегрузок. Использование технологий, таких как ограничение количества запросов с одного IP-адреса, может значительно снизить вероятность успешных атак. При тестировании на уязвимость для перебора паролей, сервер успешно обработал все запросы, но при большом количестве попыток входа зафиксировал превышение лимита попыток, что обеспечило дополнительную защиту от таких атак. В будущем необходимо будет улучшить механизм аутентификации, внедрив, например, многофакторную аутентификацию или использование CAPTCHA для защиты от автоматических атак.

Во время эксперимента важно было наблюдать за логами сервера, которые фиксировали все поступающие запросы. Анализ логов показал, что атаки были зарегистрированы в реальном времени и зафиксированы в журнале. Это позволяет в будущем оперативно реагировать на попытки атак и проводить дальнейший анализ для улучшения системы

безопасности. Внедрение более продвинутых систем мониторинга и анализа трафика поможет быстро выявлять аномалии в работе сервера и принимать меры по защите.

Результаты эксперимента подтверждают, что сервер уязвим для некоторых типов атак, таких как SQL-инъекции и DDoS-атаки (рис. 4).



**Рис. 4 – Ошибки сервера при DDoS-атаке**  
**Fig. 4 – Server errors during a DDoS attack**

Для повышения уровня безопасности необходимо применить дополнительные меры защиты, такие как подготовленные запросы для работы с базами данных, использование механизмов защиты от перегрузок и оптимизация серверных процессов. Также стоит рассмотреть внедрение системы для защиты от брутфорс-атак и улучшение системы аутентификации.

**Вывод.** В процессе проведения эксперимента с эмуляцией атак на компьютерные сети были изучены реакции серверной части на различные виды атак, включая SQL-инъекции, DDoS-атаки и перебор паролей. Использование Python для создания моделей атак и их анализа позволило выявить ключевые уязвимости в серверной архитектуре и предложить рекомендации для их устранения. Результаты эксперимента продемонстрировали, что сервер подвержен значительным задержкам и отказам в обслуживании при нагрузке, создаваемой DDoS-атаками, а также выявили уязвимости, связанные с недостаточной защитой от SQL-инъекций. Наблюдения за временем отклика сервера подтвердили необходимость внедрения механизмов защиты от перегрузок и автоматического блокирования атакующих запросов. Также важным результатом является обнаружение необходимости улучшения механизмов аутентификации и защиты от брутфорс-атак. Для повышения уровня безопасности серверных систем было рекомендовано:

1. Использование подготовленных запросов для предотвращения SQL-инъекций.
2. Внедрение защиты от DDoS-атак, включая использование сервисов фильтрации трафика и балансировки нагрузки.
3. Оптимизация серверной инфраструктуры для более быстрой обработки запросов.
4. Внедрение многофакторной аутентификации и защита от автоматических атак через CAPTCHA.

Проведенные эксперименты и анализ полученных данных подтвердили важность комплексного подхода к защите серверных систем, где необходимо сочетать механизмы защиты от различных типов атак, улучшать серверную инфраструктуру и внедрять современные методы мониторинга и анализа трафика.

#### Библиографический список:

1. "ARP-spoofing". Википедия. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/ARP-spoofing>
2. "DDoS Attacks: A Primer". Cloudflare. Режим доступа: <https://www.cloudflare.com/learning/ddos/what-is-a-ddos-attack/>
3. "Understanding SQL Injection Attacks". Acunetix. – Режим доступа: <https://www.acunetix.com/websitesecurity/sql-injection/>
4. "Scapy: Packet Manipulation Tool". Официальная документация Scapy. – Режим доступа: <https://scapy.readthedocs.io/en/latest/>
5. "Requests: HTTP for Humans". Официальная документация Requests. – Режим доступа: <https://docs.python-requests.org/en/master/>
6. "Python Network Programming". Автор: John Goerzen. – Режим доступа: <https://www.oreilly.com/library/view/python-network-programming/9781788621755/>

7. "Black Hat Python: Python Programming for Hackers and Pentesters". Автор: Justin Seitz. – Режим доступа: [<https://www.no-starch.com/black-hat-python>] (<https://www.no-starch.com/black-hat-python>)
8. "Wireshark User Guide". Wireshark. – Режим доступа: [https://www.wireshark.org/docs/wsug\\_html\\_chunked/](https://www.wireshark.org/docs/wsug_html_chunked/)
9. "Metasploit Unleashed". Offensive Security. – Режим доступа: <https://www.offensive-security.com/metasploit-unleashed/>
10. "OWASP Top Ten Project". OWASP. – Режим доступа: <https://owasp.org/www-project-top-ten/>
11. "Hacking: The Art of Exploitation". Автор: Jon Erickson. – Режим доступа: <https://www.nostarch.com/hacking2.htm>
12. "The Web Application Hacker's Handbook". Автор: Dafydd Stuttard, Marcus Pinto. – Режим доступа: <https://www.wiley.com/en-us/The+Web+Application+Hacker%27s+Handbook%3A+Discovering+and+Exploiting+Security+Flaws%2C+2nd+Edition-p-9781118026476>
13. "Practical Packet Analysis". Автор: Chris Sanders. Режим доступа: <https://www.oreilly.com/library/view/practical-packet-analysis/9781593273037/>
14. "The Hacker Playbook 2: Practical Guide To Penetration Testing". Автор: Peter Kim. – Режим доступа: <https://www.hackerplaybook.com/>
15. "Gray Hat Python: Python Programming for Hackers and Reverse Engineers". Автор: Justin Seitz. – Режим доступа: [<https://www.no-starch.com/gray-hat-python>] (<https://www.no-starch.com/gray-hat-python>)

#### References:

1. "ARP Spoofing." Wikipedia. – Available at: <https://ru.wikipedia.org/wiki/ARP-spoofing>
2. "DDoS Attacks: A Primer." Cloudflare. Available at: <https://www.cloudflare.com/learning/ddos/what-is-a-ddos-attack/>
3. "Understanding SQL Injection Attacks." Acunetix. – [www.acunetix.com/websitesecurity/sql-injection/](http://www.acunetix.com/websitesecurity/sql-injection/)
4. "Scapy: Packet Manipulation Tool." Official Scapy Documentation. <https://scapy.readthedocs.io/en/latest/>
5. "Requests: HTTP for Humans." Official Requests Documentation. – Available at: <https://docs.python-requests.org/en/master/>
6. "Python Network Programming". By John Goerzen. <https://www.oreilly.com/library/view/python-network-programming/9781788621755/>
7. "Black Hat Python: Python Programming for Hackers and Pentesters." By Justin Seitz. – [<https://www.no-starch.com/black-hat-python>] (<https://www.no-starch.com/black-hat-python>)
8. "Wireshark User Guide." Wireshark. – [https://www.wireshark.org/docs/wsug\\_html\\_chunked/](https://www.wireshark.org/docs/wsug_html_chunked/)
9. "Metasploit Unleashed." Offensive Security. – <https://www.offensive-security.com/metasploit-unleashed/>
10. "OWASP Top Ten Project." OWASP. – Access mode: <https://owasp.org/www-project-top-ten/>
11. "Hacking: The Art of Exploitation" by Jon Erickson. – <https://www.nostarch.com/hacking2.htm>
12. "The Web Application Hacker's Handbook" by Dafydd Stuttard, Marcus Pinto. <https://www.wiley.com/en-us/The+Web+Application+Hacker%27s+Handbook%3A+Discovering+and+Exploiting+Security+Flaws%2C+2nd+Edition-p-9781118026476>
13. "Practical Packet Analysis" by Chris Sanders. <https://www.oreilly.com/library/view/practical-packet-analysis/9781593273037/>
14. "The Hacker Playbook 2: Practical Guide to Penetration Testing." By Peter Kim. – Available at: <https://www.hackerplaybook.com/>
15. "Gray Hat Python: Python Programming for Hackers and Reverse Engineers." By Justin Seitz.: [<https://www.no-starch.com/gray-hat-python>] (<https://www.no-starch.com/gray-hat-python>)

#### Сведения об авторах:

Куликов Алексей Петрович, студент, кафедра «Программная инженерия»; [a.k.010@yandex.ru](mailto:a.k.010@yandex.ru)  
Радаева Елизавета Андреевна, студент, кафедра «Программная инженерия»; [radaeva.liza@list.ru](mailto:radaeva.liza@list.ru)  
Якупов Денис Олегович, старший преподаватель, кафедра «Программная инженерия»; [d.yakupov@psuti.ru](mailto:d.yakupov@psuti.ru)

#### Information about the authors:

Alexey P. Kulikov, Student, Department of Software Engineering; [a.k.010@yandex.ru](mailto:a.k.010@yandex.ru)  
Elizaveta A. Radaeva, Student, Department of Software Engineering; [radaeva.liza@list.ru](mailto:radaeva.liza@list.ru)  
Denis O. Yakupov, Senior Lecturer, Department of Software Engineering, [d.yakupov@psuti.ru](mailto:d.yakupov@psuti.ru)

#### Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/ Received 19.03.2025.

Одобрена после рецензирования/Revised 17.05.2025.

Принята в печать/Accepted for publication 30.09.2025.

## Обеспечение реализации строительных проектов для нефтегазового комплекса на базе технологий искусственного интеллекта

И.И. Лившиц

Национальный исследовательский университет ИТМО,  
197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49, Россия

**Резюме. Цель.** Целью исследования является изучение практики применения современных технологий искусственного интеллекта для целей обеспечения реализации международных и национальных строительных проектов в нефтегазовом комплексе. **Метод.** Исследование основано на методах структурного и системного анализа; методов сопоставления современных стандартов, применимых для реализации и оценивания строительных проектов нефтегазового комплекса на базе технологий ИИ. **Результат.** Наиболее важными результатами являются практические примеры и комплексный анализ применения современных технологий ИИ для целей обеспечения реализации строительных проектов в нефтегазовом комплексе. Рассмотрены риски применения технологий ИИ при реализации строительных проектов, поскольку существующая нормативная база национальных и международных стандартов не обеспечивает в полной мере достаточные критерии оценивания таких рисков. **Вывод.** Научная новизна заключается в дополнении существующих методов реализации строительных проектов современными технологиями ИИ, позволяющими добиться измеримых преимуществ (снижения стоимости, повышения точности и скорости технических операций, снижения рисков), которые могут быть численно определены и сопоставлены с известными статьями проектных затрат.

**Ключевые слова:** информационная технология, искусственный интеллект, стандарт, строительный проект, оценивание рисков, риск искусственного интеллекта, валидация, верификация, цифровая трансформация

**Для цитирования:** И.И. Лившиц. Обеспечение реализации строительных проектов для нефтегазового комплекса на базе технологий искусственного интеллекта. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025;52(4):99-105. DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-4-99-105

## Supporting the implementation of construction projects for the oil and gas industry using artificial intelligence technologies

I.I. Livshits

National Research University ITMO,  
49 Kronverksky Ave., St. Petersburg 197101, Russia

**Abstract. Objective.** The purpose of this study is to examine the application of modern artificial intelligence technologies to support the implementation of international and national construction projects in the oil and gas sector. **Method.** The study is based on structural and systemic analysis methods, as well as methods for comparing modern standards applicable to the implementation and evaluation of AI-based oil and gas construction projects. **Result.** The most important results are practical examples and a comprehensive analysis of the application of modern AI technologies to support the implementation of construction projects in the oil and gas sector. The risks of using AI technologies in construction projects are considered, as the existing regulatory framework of national and international standards does not provide sufficient risk assessment criteria. **Conclusion.** The scientific novelty lies in complementing existing construction project implementation methods with modern AI technologies, which enable benefits (reduced costs,

increased accuracy and speed of technical operations, and reduced risks) that can be quantified and compared with known project cost items.

**Keywords:** information technology, artificial intelligence, standard, construction project, risk assessment, artificial intelligence risk, validation, verification, digital transformation

**For citation:** I.I. Livshits. Supporting the implementation of construction projects for the oil and gas industry using artificial intelligence technologies. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2025; 52(4):99-105. (In Russ) DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-4-99-105

**Введение.** Проблема применения современных информационных технологий (ИТ) при реализации строительных проектов для нефтегазового комплекса не является новой, однако в настоящее время уровень «насыщения» и полезного применения новых ИТ не является адекватным по отношению к известным и перспективным требованиям [1-4]. Известные примеры строительных проектов для нефтегазового комплекса, реализованных крупнейшими строительными компаниями России и мира, показывают актуальность поддержки инициатив цифровой трансформации, внедрения «цифровых двойников», беспилотных систем и технологий ИИ.

К сожалению, в доступных публикациях практически не рассматриваются технические и экономические детали реализации таких цифровых инициатив, часто ограничиваясь только описанием пилотных проектов [1,5]. Наибольший интерес при реализации крупных строительных проектов для нефтегазового комплекса вызывает реализация экономических преимуществ (снижения стоимости, повышения точности и скорости технических операций, снижения рисков), основанная на документировании рисков современных ИТ, в том числе ИИ. В равной мере аспекты применения современных ИТ, а также проблемы производительности и качества данных для успешного применения технологий ИИ в строительной отрасли рассматриваются в работах зарубежных исследователей [6-8].

**Постановка задачи.** В определенном смысле для решения данной проблемы могут быть применены актуальные стандарты в области управления ИИ (например, ISO/IEC 42001:2023 Information technology - Artificial intelligence - Management system) и обеспечения кибербезопасности (например, ISO/IEC 27032:2023 Cybersecurity - Guidelines for Internet security). Тем не менее, даже с учетом того факта, что указанные стандарты приняты 2 года назад, они практически мало известны даже разработчикам новых ИТ, в том числе ИИ [9,10]. Кроме того, представляется целесообразным распространить на новые технологии ИИ требования к валидации и верификации программных компонент (например, на базе национального ГОСТ Р серии 57700 Численное моделирование для разработки и сдачи в эксплуатацию высокотехнологичных промышленных изделий. Сертификация программного обеспечения. Требования), но и эта практика, к сожалению, в настоящее время мало известна и практически не применяется [11-13]. Уместно отметить, что даже такие известные ИТ, как системы электронного документооборота могут представлять определенную сложность при внедрении в компанию, выполняющие территориально распределённые проекты для нефтегазового комплекса [12].

**Методы исследования.** Представляется целесообразным рассмотреть актуальные инициативы Российской Федерации в области стандартизации применения современных ИТ, в частности, цифрового моделирования и ИИ:

- разработка компанией «Газпром нефть» стандарта применения ИИ для строительного надзора (позволило на 80% повысить скорость инспекций новых строительных объектов);
- утверждение Росстандартом нового национального стандарта ГОСТ Р 10.00.00.01 «Единая система информационного моделирования. Термины и определения» (разработка велась на базе Технического комитета по стандартизации ТК 505 «Информационное моделирование»). В стандарте содержится свыше 70 терминов, используемых на всех этапах жизненного цикла объекта моделирования;

— обеспечение Росстандартом фонда национальных стандартов в сфере ИТ – всего более 2000 документов, в том числе: технологий ИИ, кибер-физических систем, информационной поддержки жизненного цикла изделий и др.

Объективно наблюдается неполнота обеспечения современными ИТ (в том числе технологиями ИИ) процесса реализации строительных проектов, что требует пристального изучения известных успешных примеров внедрения таких технологий, формирования критериев оценивания и анализа возможностей тиражирования наиболее применимых технологий к конкретным условиям строительства нефтегазового комплекса в Российской Федерации. Известные примеры применения технологий ИИ при реализации крупнейших международных и национальных строительных проектов применительно к области нефтегазового комплекса представлены в табл 1.

**Таблица 1. Примеры применения технологий ИИ при реализации строительных проектов**  
**Table 1. Examples of the application of AI technologies in the implementation of construction projects**

| Компания<br>Company | Проект<br>Project   | Краткое описание<br>Brief Description  | Ключевые рычаги<br>воздействия<br>Key Leverage  | Экономический эффект<br>Economic Impact  |
|---------------------|---|--|---|--|
| Vinci               | Cyclope.ai  | Система класса "Spreading Transportation Intelligence" предназначена для обслуживания дорожной деятельности на базе ИИ для создания более управляемых, совместно используемых и устойчивых дорожных сетей          | 1. Автоматическое обнаружение дорожных инцидентов<br>2. Автоматическая классификация ТС<br>3. Анализ трафика на базе интеллектуального видеоанализа   | Повышение безопасности, снижение количества инцидентов, детектирование и распознавание ТС на разных дорогах (360 млн транзакций в год)<br>Проект Lima Expresa (VINCI Highways/VINCI Concessions) обеспечил снижение инцидентов в 2023 г. на 70%. Доступность инфраструктуры на уровне 99,9934% |
| Bouygues            | Проект цифровой трансформации на базе ChatGPT                                   | Применение решений на базе ChatGPT для управления стоимостью проектов, выявления рисков для команд управления качеством различных проектов в течении всего строительного цикла                                     | Оптимизация стоимости строительства (более 140 тонн металлоконструкций только на 1 проекте), оптимальное размещение персонала.<br>Снижение привлекаемых рабочих и техники.<br>Применение междисциплинарного решения для оптимизации   | 1. Снижение стоимости, оптимальное размещение персонала на площадке, исключение повторения проблем.<br>2. Снижение рисков влияет на увеличение прибыли 9 млн. евро (1-й квартал 2023) против убытков 66 млн. евро (год к году)   |
| Larsen & Toubro     | Generative AI (GenAI) на базе платформы Azure OpenAI                            | Generative AI (GenAI) на базе платформы Azure OpenAI для снижения стоимости строительных работ и планирования оптимального размещения персонала и механизмов   | 1. Увеличения продуктивности планирования строительных процессов.<br>2. Разработка новых сервисов для снижения стоимости строительства  | Сокращение времени планирования с 2 недель до 10 минут.<br>Снижение стоимости строительства на 2% - 3%.  |
| Fluor Corporation   | EPC Project Health Diagnostics (EPhD) и Market Dynamics/Spend Analytics (MD/SA) | Системы EPC Project Health Diagnostics (EPhD) и Market Dynamics/Spend Analytics (MD/SA) анализируют данные на каждой фазе строительного проекта для выявления ключевых трендов и получения точных метрик           | 1. Решение комплексной проблемы агрегации множества данных, персонала и иных элементов для удержания проекта в сроках и бюджете<br>2. Реализация предиктивной проектной аналитики и лучшей "последовательности" выполнения строительных работ.<br>3. Выявление паттернов в структурированных и неструктурированных данных | 1. Предсказывать проблемы, например рост затрат, на основе исторических данных;<br>2. Получать ранние выводы на базе множества факторов;<br>3. Выявлять корневые причины проблем и потенциальное влияние изменений на процесс принятия решения   |
| Saipem S.p.a        | Program AI 4 Engineering  | Решение на базе ИИ для управления инженерными проектами и строительством в секторе инфраструктуры. Решение включает управление проектированием, закупками и цепочками поставщиков.                                 | 1. Снижение времени на проектные решения<br>2. Улучшение взаимодействия всех участников больших проектов<br>3. Применение систем машинного обучения   | 1. Формирование лучших стратегий реализации проектов<br>2. Оптимизация строительства на базе 1D, 2D 3D моделей.<br>3. Оптимизация стоимости выполнения строительных проектов.  |
| Balfour Beatty      | Balfour Beatty track inspection system  | Система Balfour Beatty track inspection system обеспечивает существенное ускорение и упрощение технических инспекций всего парка ТС на линии, высокое качество распознавания и полную автоматизацию всего процесса | 1. Сокращение времени на техническую инспекцию ТС на линии.<br>2. Полная замена ручного труда на автоматическую цифровую систему инспекций.<br>3. Значительное повышение уровня безопасности труда  | Экономия более 10 млн. фунтов стерлингов в год на стоимости технического обслуживания  |
| TechnipFMC          | Cerebra Cognitive Digital Twin  | Решение Cerebra Cognitive Digital Twin обеспечивает развитие технологий на базе цифровых практик глубокого машинного обучения,   | 1. Сокращение времени на реализацию строительных проектов.  | 1. Формирование быстрой модели для оценивания стратегий реализации проектов<br>2. Оптимизация стоимости  |

| Компания<br>Company | Проект<br>Project                                | Краткое описание<br>Brief Description   | Ключевые рычаги<br>воздействия<br>Key Leverage  | Экономический эффект<br>Economic Impact  |
|---------------------|--|---|---|--|
|                     |  | индустриального ИИ и повышения надежности   | 2. Сокращение стоимости и количества ошибок при выборе стратегии реализации проектов  | выполнения строительных проектов (кейс производства стальных труб).  |
| Royal BAM Group     | BAM high-tech AI concrete-cure prediction system | Система BAM high-tech AI concrete-cure prediction system обеспечивает ускорение выполнения множества тестов бетона на различных строительных площадках и повышение точности тестирования по сравнению со стандартными методами классического бетонного куба                     | 1. Сокращение времени на реализацию тестов бетона при выполнении строительных проектов.<br>2. Сокращение стоимости и количества ошибок при тестировании бетона на площадках при реализации проектов | 1. Значительное ускорение (несколько дней) против недель на классическом бетонном кубе.<br>2. Точность до 5%.<br>3. Автоматическая передача данных по тестированию бетона на мобильные устройства инженеров. |
| Costain             | Trial artificial intelligence                    | Решение Trial artificial intelligence разработано для управления (формирования прогнозов) дорожного движения в условиях быстрого изменения дорожной обстановки и формирования решения для управления дорожными работами   | 1. Сокращение времени на реагирование при изменении дорожной обстановки.<br>2. Снижение количества дорожных инцидентов при изменении дорожной обстановки  | 1. Быстрое предсказание дорожных ситуаций с учетом дорожных работ и "закрытый" дорог.<br>2. Быстрый поиск эффективных маршрутов на сетях дорог при изменении дорожной обстановки                             |
| Велесстрой          | «Поток Рекрутмент»                               | Проект «Поток Рекрутмент» реализован с модулем ИИ (YandexGPT), предназначен для подбора персонала. Обеспечен унифицированный процесс подбора персонала для группы компаний в единой системе, в частности, реализована «воронка» подбора разных категорий персонала.             | 1. Оптимизации численности персонала, защита и контроль сроков найма персонала  | 1. Автоматический подбор персонала на базе ИИ для более чем 100 строительных объектов.<br>2. Результат проверки службы безопасности и полный отчет по кандидату формируется за 2 минуты                      |
| Газпром нефть       | Personik AI-платформа                            | Personik AI-платформа для HR-специалистов обеспечивает функции виртуального помощника для сотрудников «Газпром нефти» и охватывает 3 блока взаимодействия с персоналом: пребординг, онбординг и карьерное развитие  | 1. Повышение скорости кадровых функций в компании.<br>2. Снижение стоимости на обеспечение кадровых процессов   | 1. Повышение скорости кадровых функций в компании  |
| Газпром нефть       | Система ИИ для строительного надзора             | На базе сервиса дополненной реальности в «Газпром нефти» для дистанционных проверок Росприроднадзора, обеспечено повышение на 80% скорости инспекций, при гарантии качества и снижении расходов на организацию выездного контроля   | 1. Повышение скорости инспекций для строительного надзора.<br>2. Повышение качества строительного надзора<br>3. Снижение расходов на организацию выездного контроля                                 | 1. Повышение скорости строительных инспекций на 80%  |
| Сибур               | Система «AI-советчик»                            | AI-советчик на базе ИИ от Сбербанка (GigaChat) для оптимизации закупки МТР позволяет перейти от статичных записей номенклатурных позиций к параметрическим карточкам, благодаря чему система подбирает допустимые аналоги, имеющие преимущества по цене, качеству и доступности | 1. Снижение стоимости при обеспечении заданного качества и доступности  | Подбор МТР по критериям оптимизации (цена, качество, доступность)  |

**Обсуждение результатов.** Изначально выборка содержала свыше 70 проектов, но с учетом необходимости компактного описания в данной публикации рассматривается по одному наиболее представительному проекту реализации технологии ИИ от каждой наиболее крупной международной и российской строительной компании. Глубина поиска составила 5 лет (2020 – 2025 гг.), отбор проектов применения технологий ИИ определялся по релевантности применения для строительных проектов в области нефтегазового комплекса.

В качестве критериев для анализа и сопоставления выбраны:

- ключевые рычаги воздействия (на какие именно факторы реализации строительных проектов могут быть «нацелены» конкретные технологии ИИ для получения в установленный период исчислимого преимущества по сравнению с известными аналогами);
- экономический эффект (численные оценки действительно полученного экономического эффекта на конкретном проекте, например: размер снижения стоимости строительства, процент экономии на материалах, доля оптимизации численности персонала, процент повышения точности и скорости выполнения тестов и технических инспекций и пр.).

На базе полученной выборки применения технологий ИИ для строительных компаний (табл.1) рассмотрим основные векторы наилучшего практического использования на объектах:

1. Контроль исполнения планов реализации проектов (например: компании Larsen & Toubro, Saipem S.p.a.);
2. Управление персоналом, в т.ч. найм, перемещение, удержание, развитие (например: компании Bouygues, Fluor Corporation, Велесстрой);
3. Обеспечение безопасности, в том числе HSE, дорожные инциденты (например: компании Vinci, Costain, Визор Лабс);
4. Удаленные технические инспекции, в т.ч. бетон, парк ТС (например: компании Balfour Beatty, Royal BAM Group, Газпром нефть);
5. Закупки и логистика (например: компании TechnipFMC, Сибур).

Определенно, рассмотренные основные векторы наилучшего практического применения технологии ИИ позволяют выполнить простейший расчет обобщенного экономического эффекта (например, по известным проектам компании Larsen & Toubro и Royal BAM Group). По данным источников (Коммерсант, Gartner) при известном диапазоне затрат на ИТ-проекты (0,9-3,4% в зависимости от конкретной компании) получение экономии даже в 1% - 2% минимум на 1 проекте в течение года является объективно значимым позитивным результатом. Крайне целесообразно обратить внимание и на косвенный экономический эффект, который может быть значительно усилен благодаря «кумулятивному эффекту», когда «простые» проектные сущности переводятся в «цифру» и дают эффект по ранее «невидимым» для высшего менеджмента областям контроля. На рис.1 показан пример отчета по КПД более 500%).

| Подкласс                         | Q | Кол-во ТС | Время работы по ПЛ, ч | Время ДВС, ч | КПД, ч       | Тариф, руб/моточас | Q    | Стоимость работы по ПЛ | Стоимость полезной работы | Дельта стоимости       | % полезной работы |
|----------------------------------|---|-----------|-----------------------|--------------|--------------|--------------------|------|------------------------|---------------------------|------------------------|-------------------|
| <b>Итого</b>                     |   | <b>17</b> | <b>1 477,5</b>        | <b>776,8</b> | <b>610,1</b> |                    |      | <b>3 514 062,50 Р</b>  | <b>1 581 608,36 Р</b>     | <b>-1 932 454,14 Р</b> | <b>41,3%</b>      |
| Самосвал (10-15т)                |   | 1         | 2,5                   | 19,4         | 13,4         |                    | 1621 | 4 052,50 Р             | 21 799,30 Р               | 17 746,80 Р            | 537,9%            |
| Автогидроподъемник (29м и более) |   | 1         | 80,0                  | 84,4         | 71,1         |                    | 2223 | 177 840,00 Р           | 158 054,07 Р              | -19 785,93 Р           | 88,9%             |
| Кран автомобильный (100-190т)    |   | 1         | 120,0                 | 20,3         | 86,5         |                    | 4165 | 499 800,00 Р           | 360 215,81 Р              | -139 584,19 Р          | 72,1%             |

Рис. 1 – Пример отчета системы спутникового мониторинга строительной техники

Fig. 1 – Example of a report from a satellite monitoring system for construction equipment

Представленный на рис. 1 пример свидетельствует о том, что даже наличие хорошо известных ИТ не дает гарантии, что в конкретных строительных проектах высшее руководство получит действительно объективные, достоверные и оперативные данные. В расширенном толковании это может означать, что без должного контроля возможно «неаккуратное» применение даже хорошо известных ИТ, что создает серьёзную базу для заблаговременного изучения и анализа рисков применения перспективных технологий ИИ.

Кроме того, известный риск представляют ошибки преобразования данных (например, представлен расчет норматива машино-часов основной строительной техники, значение одного из параметров которого «выработка в смену» составил 10.000 месяцев при установленных единицах измерения «км»), (рис. 2).

| НОРМАТИВ МАШИНО-ЧАСОВ ОСНОВНОЙ ТЕХНИКИ НА 1 КМ. |   |          |                   |      |                   |                             |            |           |          |             |
|---|---|----------|-------------------|------|-------------------|-----------------------------|------------|-----------|----------|-------------|
| №   | Вид работ                               | Ед. изм. | Маш. часы на 1 км | Доля | Выработка в смену | Состав технических ресурсов |            |           |          |             |
|   |   |          |                   |      |                   | Экскаваторы                 | Бульдозеры | КТУ       | АПС      | Лаборатория |
| 1   | Сварка в нитку в трассе + контроль      | км.      | 545               | 0,27 | 220               | 1                           |            | 3         | 6        | 2           |
| 2   | Сварка в нитку                          | шт.      |                   |      | 19                | 1                           |            | 3         | 6        | 2           |
| 3   | Изоляция сварных стыков                 | км.      | 125               | 0,06 | 240               |                             |            | 2         | 1        |             |
| 4   | Разработка траншеи + устройство подушки | км.      | 400               | 0,20 | 200               | 6                           | 2          |           |          |             |
| 5   | Укладка газопровода и балластировка     | км.      | 720               | 0,35 | 10 000 мес.       | 2                           | 1          | 9         |          |             |
| 6   | Обратная засыпка газопровода            | км.      | 250               | 0,12 | 200               | 3                           | 2          |           |          |             |
|   | <b>ИТОГО по основным видам работ</b>    |          | <b>2 040</b>      |      |                   | <b>12</b>                   | <b>5</b>   | <b>14</b> | <b>7</b> | <b>2</b>    |
| 7   | Прочие виды работ                       |          | 1 520*            |      |                   | 10                          | 8          | 10        | 2        | 0           |
|   | <b>ВСЕГО на 1 км.</b>                   |          | <b>3 560</b>      |      |                   | <b>22</b>                   | <b>13</b>  | <b>24</b> | <b>9</b> | <b>2</b>    |

Рис. 2 – Пример расчет норматива машино-часов основной техники

Fig. 2 – Example of calculating the standard machine hours for the main equipment

Этот пример объективно подтверждает тот факт, что планирование применения конкретных ИТ, особенно новейших технологий ИИ для строительной компании, оперирующей тысячами единиц техники и десятками тысяч работников, должно опираться на ясную методологию, прошедшую необходимую практическую апробацию не в «комфортных» лабораторных условиях, а на реальных строительных объектах.

**Вывод.** В представленной публикации рассматривается практика применения современных технологий ИИ для целей обеспечения реализации международных и национальных строительных проектов применительно к области нефтегазового комплекса.

Представлены практические примеры и комплексный анализ применения современных технологий ИИ, которые позволили добиться определенных измеримых преимуществ (снижения стоимости, повышения точности и скорости технических операций, снижения рисков) и сформулированы основные векторы применения технологий ИИ.

Объективно подтверждено, что технологии ИИ позволяют получить существенный экономический эффект не только по основным процессам при реализации строительных проектов, но обеспечивает поддержку «полного цикла» (включая дополнительные и обеспечивающие процессы), которые ранее «выпадали» из общего контура цифровой трансформации (управление персоналом, техническими инспекциями, логистикой).

Полученные результаты могут быть применимы в компаниях, выполняющих строительные проекты к области нефтегазового комплекса.

#### **Библиографический список:**

1. Красиков А.А. Перспективы искусственного интеллекта по повышению надежности строительного процесса // В сборнике: Современная наука: актуальные вопросы, достижения и инновации. сборник статей XXXII Международной научно-практической конференции. Пенза, 2023. С. 103-105.
2. Антясова П.И., Суркова Н.Е. Анализ перспектив развития цифровых технологий в строительной сфере // Промышленные АСУ и контроллеры. 2021. № 11. С. 26-30.
3. Ивасюк Г.И., Лебедева К.Е. Новые тренды и инновации в строительной отрасли // Экономические исследования и разработки. 2023. № 3-2. С. 116-121.
4. Россихина Л.В., Орлова Д.Е., Чертов В.А. Информационная поддержка принятия решений при управлении региональными инвестиционно-строительными проектами: системный подход // Научно-техническая информация. Серия 2: Информационные процессы и системы. 2024. № 6. С. 1-12.
5. Грищенко В.С. Применение искусственного интеллекта в архитектурно-градостроительном проектировании // В сборнике: Развитие науки и практики в глобально меняющемся мире в условиях рисков (шифр -МКРНИ). Сборник материалов XXX Международной научно-практической конференции. Москва, 2024. С. 237-240.
6. Alawi O.A., Kamar H.M., Yaseen Z.M. Optimizing building energy performance predictions: A comparative study of artificial intelligence models. Journal Of Building Engineering. 2024. Т. 88. С. 109247.
7. Du X., Zhang X., Wang H., Zhi X., Huang J. Assessing green space potential accessibility through urban artificial building data in Nanjing, China. Sustainability. 2020. Т. 12. № 23. С. 9935.
8. Gao D. Application of computer artificial intelligence control technology in the comprehensive utilization of green building energy. Journal of Physics: Conference Series. 2020. Т. 1578. № 1. С. 012027.
9. Лившиц И.И. Верификация данных для процессов цифровой трансформации // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования. 2024. № 6 (81). С. 240-245.
10. Лившиц И.И. Формирование достоверных данных для процессов цифровой трансформации строительных компаний, участвующих в реализации нефтегазовых проектов // Газовая промышленность. 2025. № 1 (876). С. 64-77.
11. Лившиц И.И. Управление рисками безопасности в цепях поставок // Стандарты и качество. 2025. № 1. С. 76-81.
12. Лившиц И.И., Степин Ю.П., Соколов Е.О., Шеховцова И.Р. Математическая модель для оценки безопасности систем электронного документооборота // Газовая промышленность. 2024. № 6(867). С. 76-87.
13. 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.

#### **References:**

1. Krasikov A.A. Prospects of Artificial Intelligence for Improving the Reliability of the Construction Process // In the collection: Modern Science: Current Issues, Achievements, and Innovations. Collection of Articles from the XXXIII International Scientific and Practical Conference. Penza, 2023:103-105. (In Russ)

2. Antyasova P.I., Surkova N.E. Analysis of the Prospects for the Development of Digital Technologies in the Construction Sector. *Industrial ACS and Controllers*. 2021;11:26-30. (In Russ)
3. Ivasyuk G.I., Lebedeva K.E. New Trends and Innovations in the Construction Industry. *Economic Research and Development*. 2023;3-2:116-121. (In Russ)
4. Rossikhina L.V., Orlova D.E., Chertov V.A. Information support for decision-making in managing regional investment and construction projects: a systems approach // Scientific and technical information. Series 2: Information processes and systems. 2024;6:1-12. (In Russ)
5. Grishchenko V.S. Application of artificial intelligence in architectural and urban planning // In the collection: Development of science and practice in a globally changing world under risk conditions (code -MKRNP). Collection of materials of the XXX International scientific and practical conference. Moscow, 2024:237-240. (In Russ)
6. Alawi O.A., Kamar H.M., Yaseen Z.M. Optimizing building energy performance predictions: A comparative study of artificial intelligence models. *Journal Of Building Engineering*. 2024; 88:109-247.
7. Du X., Zhang X., Wang H., Zhi X., Huang J. Assessing green space potential accessibility through urban artificial building data in Nanjing, China. *Sustainability*. 2020; 12(23): 99-35.
8. Gao D. Application of computer artificial intelligence control technology in the comprehensive utilization of green building energy. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1578. No. 1. P. 012-027.
9. 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)
10. Livshits I.I. Formation of reliable data for digital transformation processes of construction companies involved in oil and gas projects. *Gas Industry*. 2025;1 (876):64-77. (In Russ)
11. Livshits I.I. Security risk management in supply chains. *Standards and quality*. 2025;1: 76-81. (In Russ)
12. Livshits I.I., Stepin Yu.P., Sokolov E.O., Shekhovtsova I.R. Mathematical model for assessing the security of electronic document management systems. *Gas Industry*. 2024;6 (867):76-87. (In Russ)
13. Livshits I.I., Suntsova D.I. Methodology for calculating the safety integrity level for complex industrial facilities of the fuel and energy complex. *Energy safety and energy saving*. 2024;1: 5-12. (In Russ)

**Сведения об авторе:**

Лившиц Илья Иосифович, доктор технических наук, профессор практики, [Livshitz.i@yandex.ru](mailto:Livshitz.i@yandex.ru)

**Information about author:**

Ilya I. Livshits, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of Practice; [Livshitz.i@yandex.ru](mailto: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 06.06. 2025.**

**Одобрена после рецензирования/Revised 25.07.2025.**

**Принята в печать/ Accepted for publication 10.10.2025.**

**Блочный метод принятия решения о траектории обработки графической информации как основа искусственного интеллекта в автоматизированной системе мониторинга**

**О.С. Логунова, М.Ю. Наркевич, В.Д. Корниенко**

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова,  
455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38, Россия

**Резюме. Цель.** Целью исследования является развитие теоретических основ принятия решений о техническом состоянии опасных производственных объектов для сокращения непрофильных операций экспертов, связанных с построением траектории обработки графической информации. **Метод.** Предложен блочный метод принятия решений о траектории обработки графической информации, базирующийся на введении векторного классификационного признака и содержащий четыре основных блока: блок фрагментации изображения для автоматической обработки, позволяющий определить какая часть изображения подлежит обработке: изображение в целом или его фрагмент; блок решения по принятию полученного фрагмента в обработку, позволяющий оценить соблюдение условий получения изображения по освещению; блок улучшения изображения», позволяющий выполнить изменения контрастности изображения и удаления текстуры; блок сегментации изображения и расчета показателей, позволяющий отделить искомые объекты на изображении и определить значения показателей. Для каждого блока построена и визуализирована его структура. **Результат.** В качестве апробации метода приведен пример опытной эксплуатации для оценки разрушения межпанельных швов на фасаде промышленного здания. Роль эксперта сокращается до операций оценки ситуации на изображении и заполнения координат векторного классификационного признака, и последующего принятия решения на основе результатов обработки изображения по заданной траектории. **Вывод.** Идеология предложенного метода обладает элементами фундаментальности и может быть применена для решения задач при изучении и мониторинге состояния множества объектов из любой области.

**Ключевые слова:** графическая информация, траектория обработки, векторный классификационный признак, метод принятия решения, фрагментация изображения, улучшение изображения, сегментация изображения, расчет показателей, элементы опасных производственных объектов

**Для цитирования:** О.С. Логунова, М.Ю. Наркевич, В.Д. Корниенко. Блочный метод принятия решения о траектории обработки графической информации как основа искусственного интеллекта в автоматизированной системе мониторинга. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025;52(4):106-117. DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-4-106-117

**Block method of decision making on the trajectory of graphic information processing as a basis for artificial intelligence in an automated monitoring system**

**O.S. Logunova, M.Yu. Narkevich, V.D. Kornienko**

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

**Abstract. Objective.** The aim of the study is to develop theoretical foundations for making decisions on the technical condition of hazardous industrial facilities in order to reduce non-core expert operations related to constructing a trajectory of processing graphic information. **Method.** A block-based decision-making method for processing graphic information is proposed. This

method is based on the introduction of a vector classification feature and comprises: an image fragmentation block for automatic processing, which determines which portion of the image should be processed; a decision block for accepting the resulting fragment for processing, which allows for assessing compliance with the image acquisition conditions based on lighting; an image enhancement block, which allows for changes in image contrast and texture removal; and an image segmentation and indicator calculation block, which allows for the separation of target objects in the image and the determination of indicator values. The structure of each block is constructed and visualized. **Result.** To test the method, a practical example is presented for assessing the deterioration of interpanel joints on the façade of an industrial building. The expert's role is reduced to assessing the image situation and entering the coordinates of a vector classification feature, followed by decision-making based on the image processing results along a given trajectory. **Conclusion.** The ideology of the proposed method has elements of fundamentality and can be applied to solve problems when studying and monitoring the state of many objects from any area.

**Keywords:** graphic information, processing path, vector classification feature, decision making method, image fragmentation, image enhancement, image segmentation, calculation of indicators, elements of hazardous production facilities

**For citation:** O.S. Logunova, M.Yu. Narkevich, V.D. Kornienko. Block method of decision making on the trajectory of graphic information processing as a basis for artificial intelligence in an automated monitoring system. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2025;52(4):106-117. (In Russ) DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-4-106-117

**Введение.** Современные тенденции развития промышленных предприятий характеризуются уровнем внедрения цифровых технологий в основные технологические и инфраструктурные процессы. Многие из этих процессов построены согласно строгой нормативной базе, которая в то же время также подвергается трансформации согласно требованиям приоритетного развития науки и техники. Одним из таких инфраструктурных процессов является промышленная безопасность, одной из задач которой является оценка технического состояния зданий, сооружений и территорий на основании экспертной визуальной оценки.

**Постановка задачи.** Согласно трансформации нормативной базы в области промышленной безопасности в 2023 году внесено изменение, которое допускает применение информации, полученной с использованием автоматизированных систем сбора и обработки информации при оценке качества опасных производственных объектов. Это явилось вызовом для создания систем автоматизированного мониторинга и оценки технического состояния элементов опасных производственных объектов. Для обоснования возможности создания такой системы авторами проведена оценка теоретических и практических разработок, которые могут быть положены в основу проектных решений.

В результате проведенного анализа выявлено, что:

– существуют основополагающие фундаментальные решения в области обработки графической информации, включающей процессы фрагментации, улучшения и сегментации изображений, которые систематически изложены трудах Р. Гонсалеса и Р. Вудса [1], Л. Шапиро и Дж. Стокмана [2], а также А. Я. Фомина [3];

– заложены и активно развиваются математические методы, которые базируются на современных разработках в области применения экспертных оценок, нечеткой логики, продукционных правил, методов аналогий, кластеризации, изложенные в трудах [4-9];

– разработано множество частных практических решений, которые реализованы в виде программных продуктов для решения узких специализированных задач [10-14].

Результаты поиска теоретических и практических разработок в области принятия решений в системе Российского индекса научного цитирования показал наличие журнальных статей в количестве 3378 на 11.02.2024 г. Выявлено, что наиболее востребованными (по количеству цитирования) являются технологии, построенные на основе нечеткой логики, искусственных нейронных сетей, методах анализа сетей, а также результатов

обработки графической информации как последствия внедрения цифровых технологий в процессы мониторинга и контроля. Поиск практических разработок систем поддержки принятия решений показал наличие 570 разработок отечественных программ для ЭВМ, выполненных за период с 2019 по 2023 г. Несмотря на множество фундаментальных и частных разработок, которые могут быть применены для решения задач оценки технического состояния отдельных объектов, отсутствует комплексное систематическое решение, обладающее свойством адаптивности к требованиям заказчика.

**Методы исследования.** Опираясь на результаты анализа теоретических и практических разработок в области синтеза систем автоматизированного мониторинга состояния объектов авторами работы определена цель исследования: развитие теоретических основ принятия решений о техническом состоянии опасных производственных объектов для сокращения непрофильных операций экспертов, связанных с построением траектории обработки графической информации. В опубликованной работе [15] авторами предложено ввести векторный классификационный признак для изображений элементов опасных производственных объектов. Это позволило разработать блочный метод принятия решения о траектории обработки графической информации. Развитие методов обработки изображений сформировало их обширную библиотеку в части математического описания и программной реализации. Однако специфика изображений в предметной области, в частности, для элементов опасных производственных объектов, потребовала для системы автоматизированного мониторинга выполнить формализацию экспертного опыта для перехода к уровню искусственного интеллекта.

Особенности исходных данных, определяющих специфику задачи, определены:

- разнообразием элементов опасных производственных объектов: здания, сооружения и территории [16];
- разнообразием задач, решаемых для этих объектов, которые сгруппированы как задачи распознавания объектов: регулярной, типовой и нерегулярной формы; со случайным местом расположением и расположением по проекту [16];
- требованием создания системы как единого целого с типовым пользовательским интерфейсом;
- требованием получения автоматизированным способом входной и выходной информации;
- требованием минимального участия человека-эксперта в процессе выбора траектории обработки полученной информации.

Предлагается метод построения траектории обработки изображения на основе векторного классификационного признака с использованием фасетов. Исходными данными для использования метода построения траектории обработки изображения опасного производственного объекта являются:

- векторный классификатор после определения главных координат на основе упорядоченных фасетов (1):

$$\vec{K} = (K_1^3, K_2^3, K_3^6 \{K_{31}^3, K_{32}^2\}, K_4^4 \{K_{41}^2, K_{42}^2\}, K_5^3, K_6^{36} \{K_{61}^9, K_{62}^4\}), \quad (1)$$

где  $K_1$  – объект исследования;  $K_2$  – способ освещения;  $K_3$  – характеристика элемента разрушения;  $K_{31}$  – форма объекта разрушения;  $K_{32}$  – расположение объекта разрушения;  $K_4$  – свойства фона;  $K_{41}$  – уровень текстурированности фона изображения;  $K_{42}$  – уровень отличия объекта разрушения от фона изображения;  $K_5$  – характеристика формы гистограммы изображения;  $K_6$  – характеристика задачи;  $K_{61}$  – вид задачи;  $K_{62}$  – показатели задачи; верхний индекс координаты показывает количество значений, которые она может принимать;

- фасеты алгоритмов: предварительной обработки изображения, алгоритмов фрагментации, алгоритмов распознавания изображений и алгоритмов расчета признаков видимых нарушений поверхности объектов;
- отношение простого или составного соответствия значения фасетов и элементов множества алгоритмов обработки изображения опасного производственного объекта.

В общем аналитическом виде предлагаемый метод записывается с помощью последовательности отображений:

$$Image(\vec{K}) \xrightarrow{\{R_{1i}(\{P_{1k}\})\}} (\{(Alg_{1,j_1}), (Alg_{2,j_2}), (Alg_{3,j_3})\}) \xrightarrow{\{Alg_{Rm}(\{P_m\})\}} \{V_s(Image)\}, \quad (2)$$

$$i = \overline{1, M_1}, k = \overline{1, M_2}, j_1 = \overline{1, J_1}, j_2 = \overline{1, J_2}, j_3 = \overline{1, J_3} s = \overline{1, M_3},$$

где  $Image$  – исходное изображение опасного производственного объекта;  $\vec{K}$  – векторный классификационный признак;  $\{R_{1i}(\{P_{1k}\})\}$  – кортеж правил принятия решений о выборе алгоритмов для включения в траекторию обработки информации;  $R_{1i}$  – правило;  $P_{1k}$  – настроечные параметры правил;  $\{(Alg_{1,j_1}), (Alg_{2,j_2}), (Alg_{3,j_3})\}$  – траектория обработки изображения, в которой  $(Alg_{1,j_1})$  – последовательность алгоритмов для предварительной обработки изображения,  $(Alg_{2,j_2})$  – последовательность алгоритмов для выполнения фрагментации изображения и  $(Alg_{3,j_3})$  – последовательность алгоритмов распознавания элементов на изображении;  $\{Alg_{Rm}(\{P_m\})\}$  – кортеж алгоритмов для расчета показателей разрушения видимой поверхности объектов; изображении;  $P_m$  – настроечные параметры алгоритмов;  $\{V_s(Image)\}$  – кортеж показателей разрушения видимой поверхности объектов;  $M_1$  – количество правил принятия решений для включения алгоритмов в траекторию;  $M_2$  – количество параметров для настройки правил принятия решений;  $J_1, J_2, J_3$  – размерность кортежей в последовательности алгоритмов;  $M_3$  – количество алгоритмов, необходимых для расчета показателей разрушения видимой поверхности объектов.

Кортеж правил принятия решений о выборе алгоритмов для включения в траекторию обработки информации строится на основе отношения соответствия между значениями фасетов классификационного признака и фасетом алгоритмов, которые могут быть включены в траекторию обработки изображений. Отношение соответствия устанавливается эмпирически для каждого набора фасетов классификационного признака и сохраняется в базе данных для воспроизведения траектории при повторении комплекта фасет. Расширение базы правил производится в режиме реального времени при появлении новой комбинации. Метод включает следующую последовательность шагов:

1. Определение векторного классификационного признака на основе экспертной оценки по фасетным признакам;
2. Определение фасетов для алгоритмов обработки изображений по трем уровням алгоритмов: фрагментации; улучшения изображения; сегментации;
3. Выполнение экспертной оценки выбранного изображения и определение координат векторного классификационного признака для этого изображения;
4. Обращение к базе данных, хранящей возможное представление векторного классификационного признака, и определение либо отсутствие, либо наличие равного признака его по координатам;
5. Если соответствия не найдено, то строится карта соответствия координат и алгоритмов обработки изображения с учетом мнения экспертов, при этом должны учитываться все возможные варианты обработки, иначе для всех найденных соответствий извлекаются из базы данных траектории обработки;
6. Применение построенных или синтезированных траекторий для обработки изображений элементов опасных производственных объектов;
7. Расчет показателей разрушения поверхности по изображениям объектов после обработки, согласно выбранным траекториям, и их визуализация.

Результаты системного анализа требований, исходных данных и опыта разработки систем искусственного интеллекта в других областях привели к построению блочного метода принятия решения о траектории обработки графической информации.

Система предполагает использование четырех основных блоков:

Блок 1 – «Блок фрагментации изображения для автоматической обработки», позволяющий определить какая часть изображения подлежит обработке: изображение в целом или его фрагмент (рис. 1);

Блок 2 – «Блок решения по принятию полученного фрагмента в обработку», позволяющий оценить соблюдение условий получения изображения по освещению (рис. 2);

Блок 3 – «Блок улучшения изображения», позволяющий выполнить изменения контрастности изображения и удаления текстуры (рис. 3);

Блок 4 – «Блок сегментации изображения и расчета показателей» (рис. 4), позволяющий отделить искомые объекты на изображении и определить значения показателей.

Произведем разбор структуры и информации по блокам. На рис. 1 приведена структура Блока 1 для фрагментации изображения. На рис.1 введены обозначения:

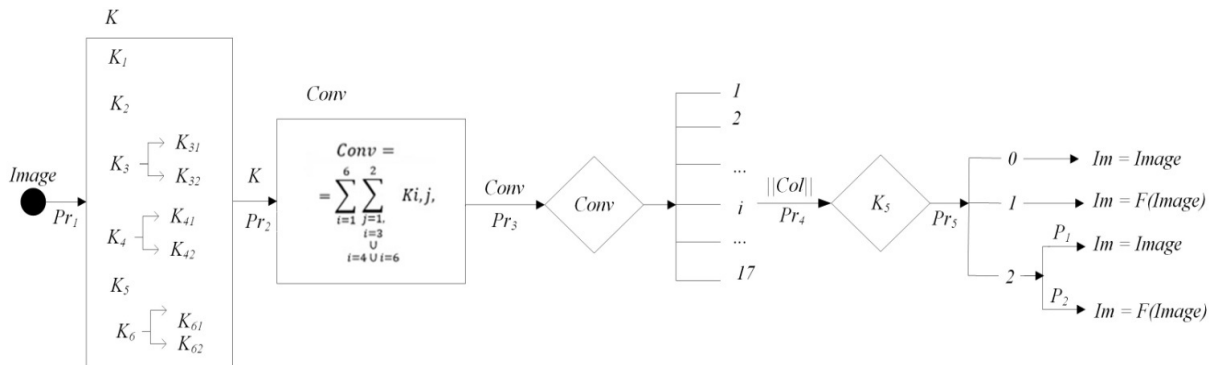


Рис. 1 – Структура Блока 1 для фрагментации изображения

Fig. 1 – Block 1 structure for image fragmentation

*Image* – исходное изображение, поступающее в систему; *K* – векторный классификационный признак; *Pr<sub>1</sub>* – процедура экспертного оценивания изображения; *Pr<sub>2</sub>* – процедура определения свертки изображения; *Conv* – свертка изображения; *Pr<sub>3</sub>* – выбор значения свертки; *Pr<sub>4</sub>* – формирование матрицы коллизий; *||Col||* – матрица коллизий для выбранной свертки; *Pr<sub>5</sub>* – оценка вида гистограммы изображения; *Im* – объект обработки; *F(Image)* – фрагмент исходного изображения; *P<sub>1</sub>* – вероятность выбора всего изображения в данной коллизии; *P<sub>2</sub>* – вероятность выбора фрагмента в данной коллизии.

В Блоке 1 выполняются действия по формированию векторного классификационного признака (блок *K*), определение свертки по сумме координат; выбора значения свертки для поступившего изображения; определении матрицы коллизий для выбранного значения свертки; определение объекта обработки по количеству глобальных максимумов на гистограмме. Результатом работы Блока 1 является структура:

$$R_0 = (Image, Conv, ||Col||, Im). \quad (3)$$

На рис. 2 приведена структура Блока 2 – «Блок решения по принятию полученного фрагмента в обработку». На рис. 2 введены обозначения: *Im<sub>1</sub>* – изображение после выполнения процедуры отсева; *Alg<sub>21</sub>* – алгоритм для повышения контраста на изображении;  $\emptyset$  – знак удаления изображения из базы; *Alg<sub>22</sub>* – алгоритм удаления изображения из базы.

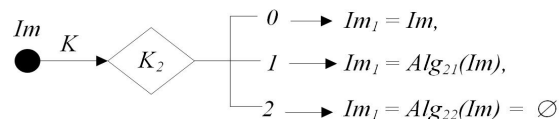


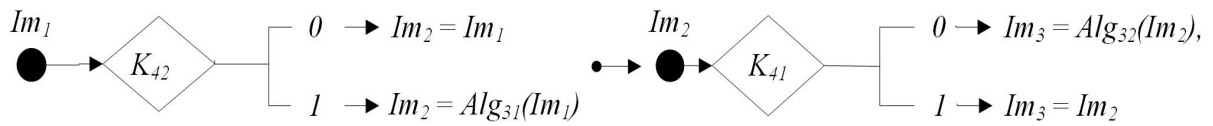
Рис. 2 – Структура Блока 2 – «Блок решения по принятию полученного фрагмента в обработку»

Fig. 2 – Structure of Block 2 – “Block for decision on accepting the received fragment for processing”

В Блоке 2 для выбранного фрагмента исходного изображения оценивается соблюдение условий сбора информации с помощью аппаратного обеспечения. Из рассмотрения выводятся изображения, полученные в ночное время, и для изображений, полученных при облачном небе, выполняется увеличение контрастности. Изображения, полученные в солнечную погоду, передаются для дальнейшей обработки без изменения. Результатом работы Блока 2 является преобразованное изображение *Im<sub>1</sub>*.

На рис. 3 приведена структура Блока 3 «Блок улучшения изображения». Блок 3 является двухэтапным. На первом этапе по значению координаты *K<sub>42</sub>* определяется необходимость изменения контрастности изображения при малом отличии искомых объектов от фона. Результатом обработки на первом этапе является новое изображение *Im<sub>2</sub>*. На втором этапе происходит отделение искомых объектов от текстуры при ее наличии. Результатом

обработки на втором этапе является новое изображение  $Im_3$ , которое передается в Блок 4 для сегментации.

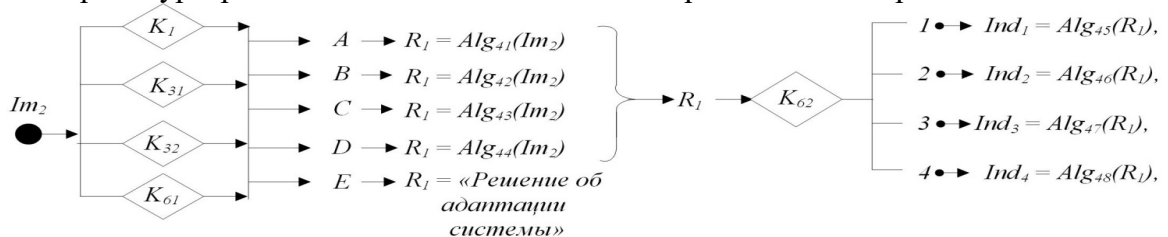


**Рис. 3 – Структура Блока 3 – «Блок улучшения изображения»**

**Fig. 3 – Structure of Block 3 – “Image Enhancement Block”**

На рис. 3 введены обозначения:  $Im_2$  – результирующее изображение после изменения контрастности;  $Alg_{32}$  – алгоритм удаления текстуры с изображения (алгоритм *Amle* – *Absolutely Minim Lipschitz Extension*).

На рис. 4 приведена структура Блока 4 «Блок сегментации изображения и расчета показателей». Блок 4 также содержит два этапа: этап 1: выбор алгоритма для сегментации; этап 2: процедуры расчета показателей для сегментированного изображения.



**Рис. 4 – Структура Блока 4 – «Блок сегментации изображения и расчета показателей»**

**Fig. 4 – Structure of Block 4 – “Block of image segmentation and calculation of indicators”**

На рис. 4 введены обозначения:  $Ind_1$  – протяженность объекта;  $Ind_2$  – площадь объекта;  $Ind_3$  – факт наличия;  $Ind_4$  – количество объектов;  $Alg_{45}$  – алгоритм расчета протяженности;  $Alg_{46}$  – алгоритм расчета площади;  $Alg_{47}$  – алгоритм оценки  $n$  на 0;  $Alg_{48}$  – алгоритм оценки  $n > 0$ ;  $A, B, C, D, E$  – составные условия;  $Alg_{41}$  – алгоритм Хафа для поиска линий;  $Alg_{42}$  – алгоритм пороговой обработки;  $Alg_{43}$  – алгоритм поиска шаблонов из библиотеки;  $Alg_{44}$  – алгоритм нейросетевой обработки.

В отличие от предыдущих блоков в структуре Блока 4 содержатся составные условия, которые построены на основе выбранного объекта исследования  $K_1$ , вида формы объектов сегментации  $K_{31}$  и их расположения в пространстве изображения  $K_{32}$ , вида решаемой задачи  $K_{61}$ . Составные условия первого этапа имеют вид:

$$A = (K_1 = 0) \& (K_{31} = 1) \& (K_{32} = 1) \& (K_{61} = 0); \quad (4)$$

$$B = ((K_1 = 0) \vee (K_1 = 1)) \& (K_{31} = 0) \& (K_{32} = 0) \& ((K_{61} = 1) \vee (K_{61} = 3) \vee (K_{61} = 5) \vee (K_{61} = 6)); \quad (5)$$

$$C = ((K_1 = 0) \vee (K_1 = 1)) \& (K_{31} = 2) \& (K_{32} = 1) \& (K_{61} = 4); \quad (6)$$

$$D = \forall K_1 \& (K_{31} = 0) \& (K_{32} = 0) \& ((K_{61} = 2) \vee (K_{61} = 7) \vee (K_{61} = 8)). \quad (7)$$

Результатом выполнения первого этапа Блока 4 является кортеж

$$R_1 = (Im_3, \{x_i, y_i\}), \quad i = 1, \bar{k}, \quad (8)$$

где  $Im_3$  – изображение с выделенными сегментами;  $\{x_i, y_i\}$  – координаты верхнего левого угла каждого сегмента.

Условие  $A$  определяет обработку изображения здания, на котором рассматривается разрушение межпанельных швов. С точки зрения сегментов искомые объекты представляют собой объекты регулярной формы в виде линий, которые могут быть обнаружены с помощью алгоритма Хафа.

Условие  $B$  определяет обработку изображения здания или сооружения с объектами нерегулярной формы и со случайным местом расположения, характерных при поиске областей ржавчины, разрушения лакокрасочного покрытия, образование облесений и провалов на крыше. Для сегментации таких изображений достаточно использовать алгоритмы с адаптивной пороговой обработки.

Условие  $C$  определяет обработку изображения здания или сооружения с объектами типовой формы с расположением согласно проектной документации. Для сегментации

таких объектов необходимо использовать алгоритм с масштабируемыми библиотечными объектами.

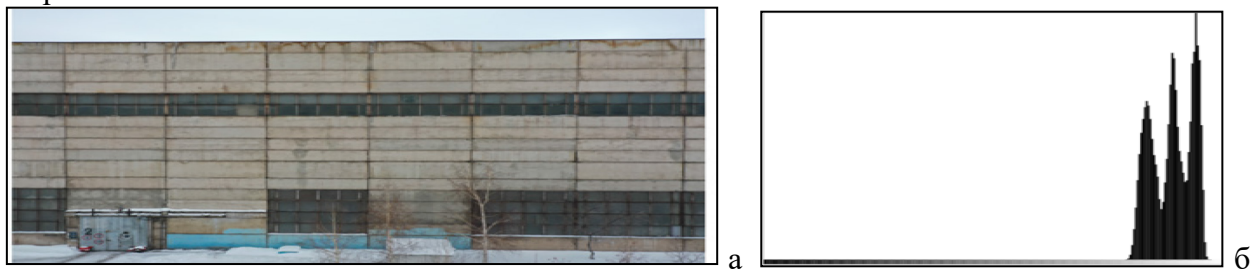
Условие *D* определяет обработку изображения зданий, сооружений и территории, на которых могут располагаться объекты в произвольных точках со случайной формой. Для сегментации таких изображений используются алгоритмы с использованием нейросетевые технологий, требующие обучение на большом количестве изображений.

Условие *E* определяет все остальные условия, которые требуют адаптации системы автоматизированного мониторинга к новым условиям или задачам.

Второй этап в Блоке 4 предназначен для расчета показателей сегментов в зависимости от запроса заказчика. Показатели сегментов вычисляются по тривиальным алгоритмам для расчета количества, суммы и факта встречаемости артефакта.

**Обсуждение результатов.** Таким образом, предложен блочный метод принятия решения о траектории обработки графической информации как основа искусственного интеллекта в автоматизированной системе мониторинга технического состояния элементов ОПО. Отличительными особенностями метода являются: поэтапная блочная структура, позволяющая осуществить функции фрагментации, улучшения и сегментации изображения, а также принятие решение о вхождении изображения в базу данных для обработки. Составные условия, используемые для принятия решения, образуют основу для построения платформы искусственного интеллекта, для которой требуется построение специального алгоритмического обеспечения и сокращают непрофильные операции экспертов, связанных с определением траектории обработки графической информации в условиях цифровой платформы.

Для демонстрации работоспособности предлагаемого блочного метода разработана программа испытания, которая является унифицированной для всех решаемых задач. Программа испытаний содержит следующие шаги: определение изображения для исследования, построение гистограммы выбранного изображения, выполнение экспертной оценки изображения и построение векторного классификационного признака, движение по блокам метода принятия решений, построение траектории обработки выбранного изображения, реализация построенной траектории обработки изображения. Одним из видов задач в техническом задании на проведение технического обследования является определение протяженности разрушений межпанельных швов на фасадах здания. В качестве исходного изображения выбрана фотография фасада здания главного корпуса участка гнутых профилей крупного металлургического предприятия, изображение которого приведено на рис. 5.



**Рис. 5 – Изображение фасада здания, полученное с использованием беспилотного мультироторного летательного аппарата: а – исходное изображение; б – гистограмма изображения**  
**Fig. 5 – Image of a building facade obtained using an unmanned multicopter aerial vehicle: a – original image; b – image histogram**

Векторный классификационный признак изображения имеет вид:

$$\vec{K} = (0^{0,96}, 1^{0,7}, 1^{0,719}, 1^1, 0^{0,59}, 0^{0,96}, 2^{0,54}, 0^{0,71}, 1^{0,73}).$$

Свертка по координатам векторного классификационного признака равна 6. На рис. 6 показана диаграмма распределения вероятностей значений координат в группе со значением свертки 6 и количество коллизий в этой группе составляет 455 значений.

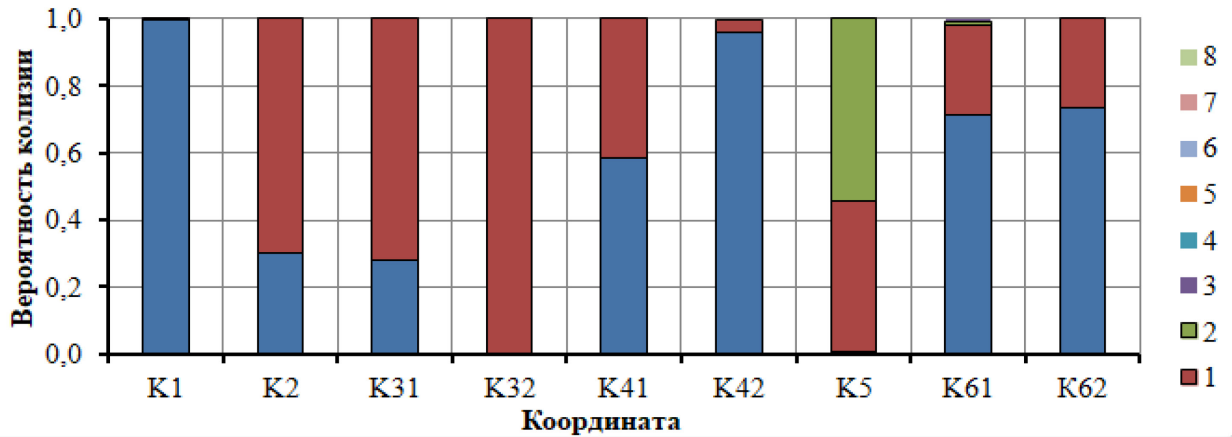


Рис. 6 – Диаграмма распределения вероятностей значений координат в группе со значением свертки 6  
 Fig. 6 – Probability distribution diagram of coordinate values in a group with a convolution value of 6

Используя полученные результаты, на рис. 7 приведены пути движения по блокам метода принятия решения при выборе траектории обработки исходного изображения.

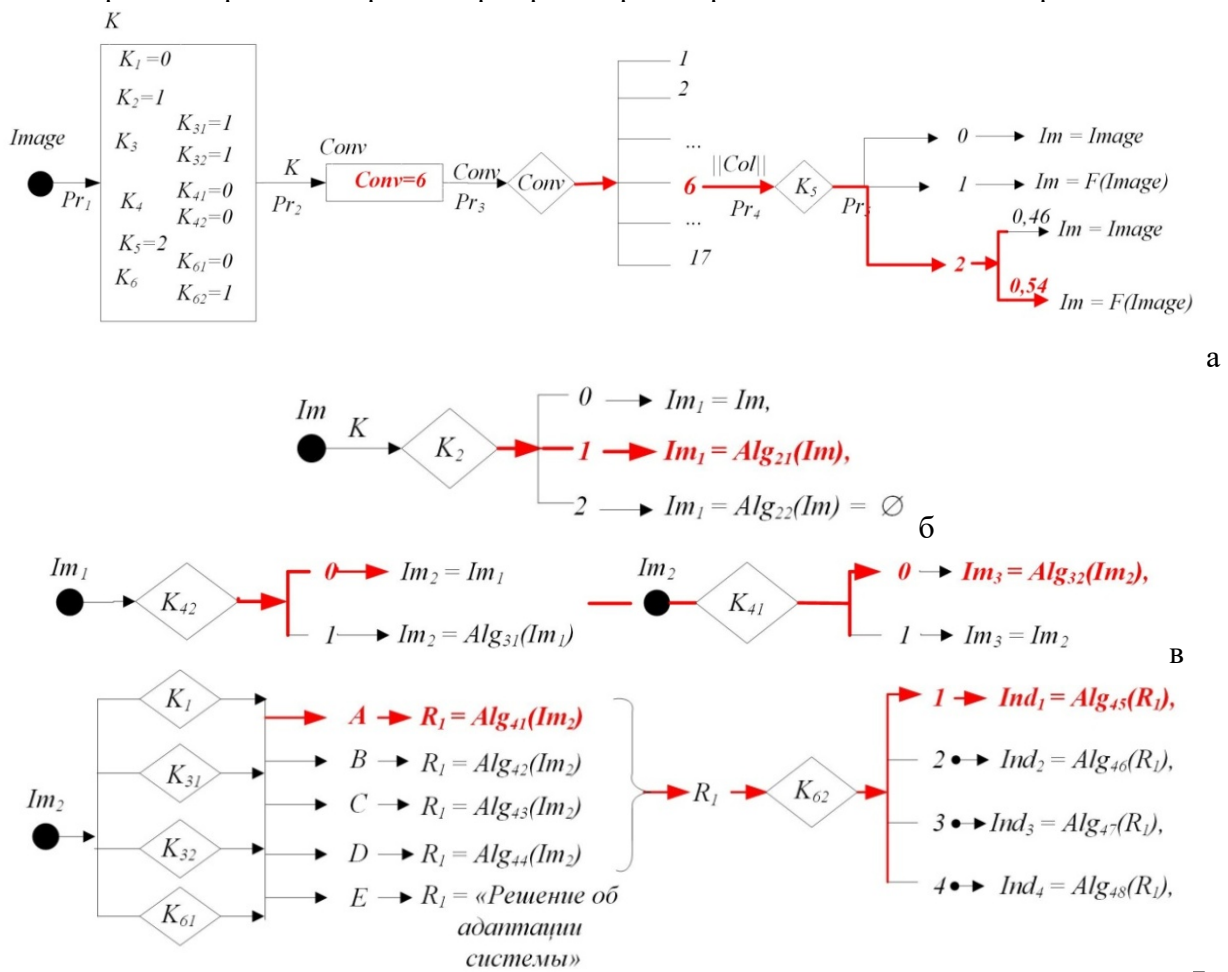


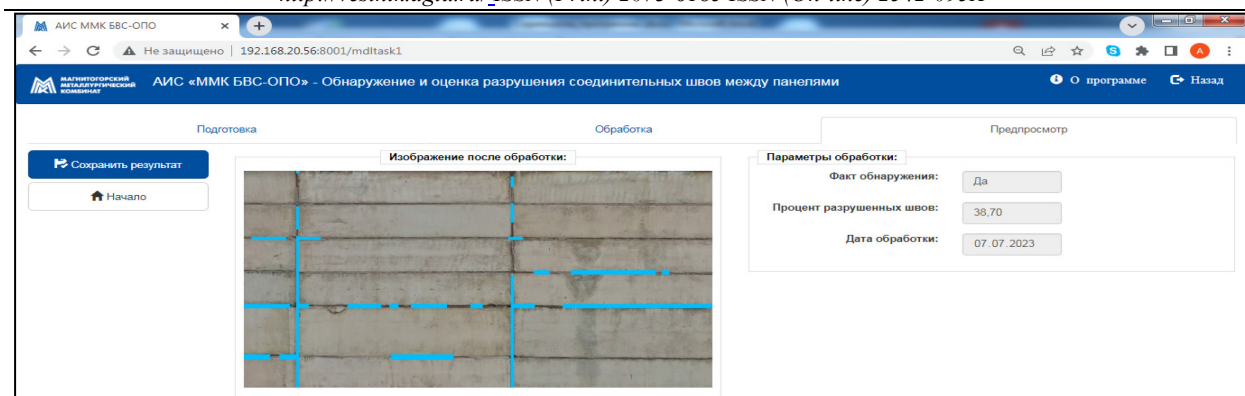
Рис. 7 – Путь движения по блокам метода принятия решений при выборе траектории обработки изображения: а – блок 1; б – блок 2; в – блок 3; г – блок 4

Fig. 7 – The path of movement through the blocks of the decision-making method when choosing an image processing trajectory: a – block 1; b – block 2; c – block 3; d – block 4

Траектория обработки исходного изображения принимает вид:

$$Tr = (\vec{K}; Conv, F(Image), Alg_{21}(Im), Alg_{32}(Im_2), Alg_{42}(Im_2), Alg_{45}(R_1)).$$

На рис. 8 приведен результат обработки изображения с использованием построенной траектории.



**Рис. 8 – Вид рабочего окна с результатами обработки в системе автоматизированного мониторинга**

**Fig. 8 – View of the working window with the results of processing in the automated monitoring system**

На форме отображены результаты оценки разрушения межпанельных швов и их количественные характеристики. Действия человека-эксперта сокращены до уровня построения векторного классификационного признака и последующего принятия решения о необходимости проведения мероприятий по устранению или профилактике найденных разрушений. Опираясь на предложенный блочный метод для принятия решений о траектории обработки графической информации авторами исследования предложена пилотная реализация прикладной цифровой платформы для автоматизированного мониторинга технического состояния элементов опасных производственных объектов. Основы построения платформы изложены в диссертационных исследованиях [17].

Обеспечивая работоспособность метода авторы использовали результаты пилотного обследования опасных производственных объектов крупного металлургического предприятия [18,19], разработали теорию гармонизации традиционных и новых показателей качества опасных производственных объектов [17], построили теорию для оптимизации траектории полета мультироторного летательного аппарата для сбора информации о техническом состоянии элементов ОПО [20], выполнили опробование новой цифровой системы на платформе разработчика. Апробирование системы доказало работоспособность предложенного метода для построения цифровых систем оценки качества элементов опасных производственных объектов для металлургического предприятия.

Идеология предложенного метода обладает элементами фундаментальности и может быть применена для решения задач при изучении и мониторинга состояния множества объектов из любой области.

**Вывод.** Построен блочный метод принятия решения о траектории обработки графической информации как основа искусственного интеллекта в автоматизированной системе мониторинга технического состояния объектов. Основу метода составляет четыре блока: блок фрагментации изображения для автоматической обработки; блок решения по принятию полученного фрагмента в обработку; блок улучшения изображения; блок сегментации изображения и расчета показателей.

Разработанный метод выполняет формализацию знаний эксперта, принимающего решение о траектории обработки изображений элементов опасных производственных объектов, и позволяет перейти к построению системы искусственного интеллекта при мониторинге технического состояния опасных производственных объектов, а также позволил выполнить сокращение непрофильных действий человека-эксперта.

**Благодарности.** Статья публикуется при поддержке НИОКР по договору между ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» и ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» по теме «Разработка и применение методик контроля территории, зданий и сооружений ПАО «ММК» с использованием беспилотных воздушных судов (БВС)».

**Acknowledgments.** This article is published with the support of research and development under an agreement between the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov" and PJSC "Magnitogorsk Iron and Steel Works" on the topic "Development and Application of Methods for Monitoring the Territory, Buildings, and Structures of PJSC "MMK" Using Unmanned Aerial Vehicles (UAVs)."

**Библиографический список:**

1. Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. М.: Техносфера, 2005. 1072 с.
2. Шапиро, Л. Компьютерное зрение / Л. Шапиро, Дж. Стокман. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. 752 с.
3. Фомин А.Я. Распознавание образов: теория и применения. 2-е изд. М.: Фазис, 2012. 429 с.
4. Ефанов Н.А. Сравнительный анализ существующих подходов к принятию управленческих решений в условиях неопределенности и систем поддержки принятия решений / Н.А. Ефанов // Экономика и управление: проблемы, решения. 2020. Т. 3, № 2. С. 129-137.
5. Тананко И.Е., Фокина Н.П. Метод анализа сетей массового обслуживания с ненадежными приборами и задержкой информации// Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. 2020. № 52. С. 90-97. DOI 10.17223/19988605/52/11.
6. Колмаков, О.В. О применимости тензорного метода стоимостного анализа сетей интегрального обслуживания / О.В. Колмаков, М.Н. Петров // Информатика. Экономика. Управление. 2023. Т. 2, № 3. С. 210-224. DOI 10.47813/2782-5280-2023-2-3-0210-0224.
7. Букаева Н.Г., Букаев Г.Г. Организация самостоятельной работы студентов // Азимут научных исследований: педагогика и психология. 2016. № 2. С. 25-32.
8. Багаев И.И. Анализ понятий нейронная сеть и сверточная нейронная сеть, обучение сверточной нейросети при помощи модуля TensorFlow / И.И. Багаев // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах. 2020. Т. 8, № 1. С. 15-22. DOI 10.18503/2306-2053-2020-8-1-15-22.
9. Липко Ю.Ю. Методика принятия решений на основе гибридного интеллекта при принятии решений в управлении деятельностью банка / Ю.Ю. Липко, В.И. Финаев // Известия ТРТУ. 2003. № 1(30). С. 77.
10. Логинов Е.Б., Зайкин А.Н. Определение уровня знаний студентов // Вектор науки ТГУ. Серия: Педагогика, психология. 2014. № 3 (12). С. 142-147.
11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020616267 Российская Федерация. Информационно-аналитическая система поддержки принятия решения в области безопасности труда и управления профессиональными рисками: № 2020615298; заявл. 27.05.2020; опубл. 15.06.2020 / И.А. Кочеткова, А.О. Матвиенко, А.В. Чернышов [и др.]; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова».
12. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019618738 Российская Федерация. Программный модуль информационной поддержки принятия решений в системах мониторинга с применением технологии 3D: № 2019617651; заявл. 26.06.2019; опубл. 04.07.2019 / А.Н. Колесенков, Ю.Ю. Володина; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина».
13. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012661139 Российская Федерация. Система оценки кристаллической структуры непрерывного слитка по фотографии: № 2012619149; заявл. 25.10.2012 / О.С. Логунова, Е.А. Ильина; заявитель Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова.
14. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018661720 Российская Федерация. Интеллектуальная система поддержки принятия решений по определению типа фундамента: № 2018618245; заявл. 03.08.2018; опубл. 12.09.2018 / Н.К. Меркулова, Т.В. Омельченко, П.Н. Омельченко; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Оренбургский государственный университет».
15. Метод принятия решений о выборе траектории обработки изображения на основе векторного классификационного признака / В.Д. Корниенко, М.Ю. Наркевич, А.Ю. Филиппов [и др.] // Электротехнические системы и комплексы. 2025. № 1(66). С. 58-66. – DOI 10.18503/2311-8318-2025-1(66)-58-66.
16. Классификация исходных данных для интеллектуальной системы экспертной оценки визуально определяемых дефектов и повреждений / В.Д. Корниенко, Г.А. Ежов, М.Ю. Наркевич, О.С. Логунова // Вестник Череповецкого государственного университета. 2022. № 6(111). С. 53-64. DOI 10.23859/1994-0637-2022-6-111-4.
17. Наркевич М.Ю. Развитие методологии создания системы менеджмента качества металлургического предприятия, эксплуатирующего опасные производственные объекты, на основе прикладной

цифровой платформы: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Наркевич Михаил Юрьевич. Магнитогорск, 2023. 332 с.

18. Results of a pilot experiment on monitoring the condition of buildings and structures using unmanned aerial vehicles / M.Yu. Narkevich, O.S. Logunova, P.I. Kalandarov [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: 2nd International Conference on Energetics, Civil and Agricultural Engineering 2021 (ICECAE 2021), Tashkent, 14–16 октября 2021 года. Vol. 939. Tashkent: IOP Science, 2021. P. 012030.
19. Качество материалов, изделий и конструкций в промышленной безопасности: эмпирическая основа / М.Ю. Наркевич, О.С. Логунова, В.Д. Корниенко [и др.] // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. – Т. 19, № 3. С. 90-101. DOI 10.18503/1995-2732-2021-19-3-90-101.
20. Элементы визуализации при обследовании опасных производственных объектов с использованием беспилотного летательного аппарата / А.Е. Козлова, М.Ю. Наркевич, О.С. Логунова, К.Е. Шахмаева // Научная визуализация. 2023. Т. 15, № 2. С. 113-124. DOI 10.26583/sv.15.2.10.

#### References:

1. Gonzalez R. Digital Image Processing / R. Gonzalez, R. Woods. Moscow: Tekhnosfera, 2005:1072 (In Russ)
2. Shapiro, L. Computer Vision / L. Shapiro, J. Stockman. Moscow: BINOM. Knowledge Laboratory, 2006. 752 p. (In Russ)
3. Fomin, A.Ya. Pattern Recognition: Theory and Applications. 2nd ed. Moscow: Fazis, 2012. 429 p. (In Russ)
4. Efanov, N.A. Comparative Analysis of Existing Approaches to Making Management Decisions under Uncertainty and Decision Support Systems. *Economics and Management: Problems, Solutions*. 2020; 3(2): 129-137. (In Russ)
5. Tananko I.E., Fokina N.P. Method for analyzing queueing networks with unreliable devices and information delay. *Bulletin of Tomsk State University. Management, Computing and Informatics*. 2020;52: 90-97. DOI 10.17223/19988605/52/11. (In Russ)
6. Kolmakov, O.V. On the applicability of the tensor method for cost analysis of integral service networks / O.V. Kolmakov, M.N. Petrov. *Computer Science. Economics. Management*. 2023; 2(3):210-224. DOI 10.47813/2782-5280-2023-2-3-0210-0224. (In Russ)
7. Bukaeva N.G., Bukaev G.G. Organization of independent work of students. *Azimuth of scientific research: pedagogy and psychology*. 2016; 2:25-32. (In Russ)
8. Bagaev I.I. Analysis of the concepts of neural network and convolutional neural network, training a convolutional neural network using the TensorFlow module. *Mathematical and software support for systems in the industrial and social spheres*. 2020; 8(1):15-22. DOI 10.18503/2306-2053-2020-8-1-15-22. (In Russ)
9. Lipko Yu.Yu. Methodology of decision-making based on hybrid intelligence in decision-making in bank management / Yu.Yu. Lipko, V.I. Finaev. *Izvestiya TRTU*. 2003;1 (30):77. (In Russ)
10. Loginov E.B., Zaykin A.N. Determining the Level of Students' Knowledge. *Vector of Science TSU. Series: Pedagogy, Psychology*. 2014; 3 (12):142-147. (In Russ)
11. Certificate of State Registration of Computer Program No. 2020616267 Russian Federation. Information and Analytical System for Supporting Decision-Making in Occupational Safety and Professional Risk Management: No. 2020615298: declared 05/27/2020: published 06/15/2020 / I.A. Kochetkova, A.O. Matvienko, A.V. Chernyshov [et al.]; Applicant: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov". (In Russ)
12. Certificate of State Registration of Computer Program No. 2019618738 Russian Federation. Software Module for Information Support of Decision-Making in Monitoring Systems Using 3D Technology: No. 2019617651: declared 26.06.2019: published 04.07.2019 / A.N. Kolesenkov, Yu.Yu. Volodina; Applicant: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin". (In Russ)
13. Certificate of State Registration of Computer Program No. 2012661139 Russian Federation. System for assessing the crystal structure of a continuous ingot using a photograph: No. 2012619149: declared 25.10.2012 / O.S. Logunova, E.A. Ilyina; applicant G.I. Nosov Magnitogorsk State Technical University.
14. Certificate of state registration of a computer program No. 2018661720 Russian Federation. Intelligent decision-making support system for determining the foundation type: No. 2018618245: declared 03.08.2018: published 12.09.2018 / N.K. Merkulova, T.V. Omelchenko, P.N. Omelchenko; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Orenburg State University" (In Russ)
15. Method for making decisions on selecting an image processing trajectory based on a vector classification feature / V.D. Kornienko, M.Yu. Narkevich, A.Yu. Filippov [et al.] *Electrical systems and complexes*. 2025; 1 (66):58-66. – DOI 10.18503/2311-8318-2025-1 (66) -58-66. (In Russ)

16. Classification of initial data for an intelligent system for expert assessment of visually detectable defects and damage / V.D. Kornienko, G.A. Yezhov, M.Yu. Narkevich, O.S. Logunova. *Bulletin of Cherepovets State University*. 2022; 6 (111): 53-64. DOI 10.23859/1994-0637-2022-6-111-4. (In Russ)
17. Narkevich M. Yu. Development of a methodology for creating a quality management system for a metallurgical enterprise operating hazardous production facilities based on an applied digital platform: dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences. Magnitogorsk, 2023. 332 p. (In Russ)
18. Results of a pilot experiment on monitoring the condition of buildings and structures using unmanned aerial vehicles / M.Yu. Narkevich, O.S. Logunova, P.I. Kalandarov [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: 2nd International Conference on Energetics, Civil and Agricultural Engineering 2021 (ICECAE 2021), Tashkent, October 14–16, 2021. Vol. 939. Tashkent: IOP Science, 2021. P. 012030.
19. Quality of Materials, Products, and Structures in Industrial Safety: An Empirical Basis / M.Yu. Narkevich, O.S. Logunova, V.D. Kornienko [et al.] *Bulletin of the Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov*. 2021;19,(3): 90-101. DOI 10.18503/1995-2732-2021-19-3-90-101. (In Russ)
20. Visualization Elements in the Inspection of Hazardous Industrial Facilities Using an Unmanned Aerial Vehicle / A.E. Kozlova, M.Yu. Narkevich, O.S. Logunova, K.E. Shakhmaeva. *Scientific Visualization*. 2023;15(2.):113-124. DOI 10.26583/sv.15.2.10. (In Russ)

**Сведения об авторах:**

Логунова Оксана Сергеевна, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Вычислительная техника и программирование»; [logunova66@mail.ru](mailto:logunova66@mail.ru)

Наркевич Михаил Юрьевич, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Промышленное и гражданское строительство»; [narkevich\\_mu@mail.ru](mailto:narkevich_mu@mail.ru)

Корниенко Владимир Дмитриевич, аспирант, кафедра «Вычислительная техника и программирование»; [volodya.kornienko2319@yandex.ru](mailto:volodya.kornienko2319@yandex.ru)

**Information about authors:**

Oksana S. Logunova, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department of "Computer Engineering and Programming"; [logunova66@mail.ru](mailto:logunova66@mail.ru)

Mikhail Yu. Narkevich, Dr. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Head of the Department of "Industrial and Civil Construction"; [narkevich\\_mu@mail.ru](mailto:narkevich_mu@mail.ru)

Vladimir D. Kornienko, Postgraduate Student, Department of "Computer Engineering and Programming"; [volodya.kornienko2319@yandex.ru](mailto:volodya.kornienko2319@yandex.ru)

**Конфликт интересов/Conflict of interest.**

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

**Поступила в редакцию/ Received 11.07.2025.**

**Одобрена после рецензирования/Revised 17. 08.2025.**

**Принята в печать /Accepted for publication 30.10.2025.**

## Поиск неиспользуемого программного обеспечения в операционных системах LINUX

А.Д. Попов

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

**Резюме. Цель.** Целью исследования является разработка программного обеспечения (ПО) на языке Python для автоматизированного поиска неиспользуемых исполняемых файлов в операционных системах Linux. Актуальность задачи обусловлена необходимостью оптимизации использования памяти, сокращения поверхности атаки и улучшения контроля над системой за счет удаления неиспользуемого ПО. Современные дистрибутивы Linux содержат множество служебных утилит и сторонних программ, которые могут никогда не использоваться, что приводит к нерациональному расходованию ресурсов. **Метод.** Исследование основано на анализе метаданных файлов (время последнего доступа — atime), сканировании каталогов из переменной окружения PATH и учете особенностей файловых систем Linux (режим relatime). **Результат.** Разработанное ПО включает две подсистемы: взаимодействия с пользователем и сбора/анализа данных. Для обеспечения переносимости предложен метод развертывания в контейнеризированной среде Docker. Создано программное решение, которое формирует отчеты о неиспользуемых исполняемых файлах на основе заданной пользователем даты, предоставляет рекомендации по удалению, включая зависимости и способы деинсталляции через менеджеры пакетов, поддерживает динамическое развертывание через Docker, адаптируясь к разным конфигурациям PATH. **Вывод.** Инструмент дополняет существующие утилиты (например, deborphan), фокусируясь на времени использования ПО. Его простота и минималистичность позволяют легко внедрять в процессы администрирования. Перспективы развития включают портирование на Golang с графическим интерфейсом и интеграцию в системы автоматизированного развертывания ОС.

**Ключевые слова:** Linux, операционная система, файловая система, программное обеспечение, менеджеры пакетов, PATH, relatime, atime, Docker

**Для цитирования:** А.Д. Попов. Поиск неиспользуемого программного обеспечения в операционных системах LINUX. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025;52(4):118-125. DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-4-118-125

## Finding Unused Software in Linux Operating Systems

A.D. Popov

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

**Abstract. Objective.** The aim of this study is to develop Python software for the automated search for unused executable files in Linux operating systems. The relevance is due to the need to optimize memory, reduce the attack surface and improve control over the system by removing unused software. Modern Linux distributions contain numerous utility programs and third-party programs that may never be used, leading to inefficient resource usage. **Method.** The study is based on file metadata analysis (last access time - atime), scanning directories from the PATH environment variable, and taking into account the specific features of Linux file systems (relatime mode). **Result.** The developed software includes two subsystems: user interaction and data collection/analysis. To ensure portability, a deployment method in a Docker containerized environment

is proposed. A software solution has been created that generates reports on unused executable files based on a user-specified date, provides removal recommendations, including dependencies and uninstallation methods via package managers, and supports dynamic deployment via Docker, adapting to different PATH configurations. **Conclusion.** The tool complements utilities (such as deborphan), focusing on software usage time. Its simplicity and minimalist design allow for integration into administrative processes. Future development prospects include porting to Golang with a graphical interface and integration into automated OS deployment systems.

**Keywords:** Linux, operating system, file system, software, package managers, PATH, relatime, atime, Docker

**For citation:** A.D. Popov. Finding Unused Software in Linux Operating Systems. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2025; 52(4):118-125. (In Russ) DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-4-118-125

**Введение.** Существующая реальность показала, что использование свободно распространяемого ПО в производственной среде является актуальным. Это обосновывается тем, что недобросовестные корпорации могут прекратить поддерживать приобретенное ПО в угоду третьим силам. Данный факт накладывает дополнительные усилия со стороны администраторов систем по поддержке работоспособности инфраструктуры предприятия. В настоящее время можно сказать, что конкуренцию проприетарному ПО, свободно распространяемое проигрывает, как и в некоторых отраслях, так и по функциональности. Но все же наблюдаются значительные тенденции, связанные с переработкой и добавления в штат отечественного. ОС в данной связке играют ключевую роль.

Управление ОС становится актуальной задачей, поскольку количество автоматизированных рабочих мест увеличивается с каждым годом. Основой для организации информационной структуры с точки зрения пользователя и администратора лежит на ОС семейства Linux. Для их управления используются программы позволяющие, автоматизировать развертывание ОС на различную инфраструктуру. К ним относятся Ansible, OpenTofu и др., а также применяются самописные скрипты [1,2]. Но в данном контексте под управлением понимается широкая область администрирования: управление пользователями, сетью, памятью, процессами и др.

**Постановка задачи.** Тенденцией в построении современных информационных систем является оптимальное использование памяти, в частности, в ОС не должно быть включено ничего лишнего, что не связано с ее функционированием. Поэтому оптимальный состав ПО в ОС Linux может сократить поверхность атаки, сэкономить используемую память и улучшить контроль над состоянием системы в целом.

В настоящее время в ОС систему включены множество служебных утилит, которые могут никогда не использоваться, как и сторонние программы после установки и однократного выполнения. Поэтому можно сказать, что память используется не по назначению до окончания жизненного цикла ОС, инсталлированного на аппаратное обеспечение. Для решения поставленной задачи необходимым навыком является управление программами в ОС Linux. Для его автоматизации актуальна разработка самостоятельного программного решения как подхода к оптимизации использования памяти, который, может являться, одним из инструментов управления ОС семейства Linux в целом.

**Методы исследования.** Знакомство с управлением программами в ОС Linux традиционно начинается с менеджеров пакетов, которые используют фактически все дистрибутивы. Они используются для установки, удаления и предоставления информации об установленном ПО. Как было сказано выше, другим способом установки ПО является пакет, который представляет собой бинарный файл. Следующим способом установки ПО является установка из исходного кода, где в большей своей содержит файл с инструкцией по установке [3,4]. После установки в основном все программы распределяются по существующим каталогам в ОС Linux по предназначению. Для того чтобы запуск программы был стандартизирован создана переменная окружения PATH, которая содержит информацию

о имеющихся каталогах [4]. При вызове программ происходит обход всех каталогов на наличие сходства и происходит ее запуск. В представленную переменную могут добавляться другие пути к каталогам для запуска программ.

Стандартное содержимое переменной PATH выглядит следующим образом «/usr/local/sbin:/usr/local/bin:/usr/sbin:/usr/bin:/sbin:/bin».

1. Директория /bin предназначена для хранятся основных исполняемых файлов, необходимых для минимальной загрузки и функционирования ОС. Данные файлы включают в себя утилиты командной строки, необходимые для работы системы, к примеру, для работы с файловой системой, команды для управления процессами и др.

2. Директория /usr/bin предназначена для хранятся основных исполняемых файлов и пользовательских программ, а также содержат утилиты и приложения, которые используются пользователями системы. В отличие от /bin, содержимое /usr/bin не является необходимым для загрузки или функционирования базовой системы.

3. В директории /sbin хранятся системные исполняемые файлы, которые используются для администрирования и управления системой. Выполнение представленных файлов обычно требуют повышенных привилегий (как правило, root). Могут быть использованы на ранних стадиях загрузки системы или для восстановления после сбоев, монтирования файловых систем, настройки сети, администрирования учетных записей и др.

4. В директории /usr/sbin хранятся системные исполняемые файлы, которые также предназначены для администрирования и управления, но они обычно не являются критически важными для базового функционирования. Данные файлы могут быть установлены отдельно от основной системы и предназначены для использования системными администраторами. В качестве примера в данный каталог включены утилиты для управления службами, настройки безопасности и др.

5. Директория /usr/local/bin предназначена для хранения исполняемых файлов и пользовательских программ, которые не входят в стандартный набор поставляемых с ОС. Обычно в данную директорию располагают программы, которые не устанавливаются с помощью пакетных менеджеров, а компилируются и устанавливаются вручную или с помощью сторонних инструментов установки. Файлы, расположенные в /usr/local/bin доступны всем пользователям системы.

6. Директория /usr/local/sbin аналогична /usr/local/bin, но предназначена для хранения системных исполняемых файлов пользовательских программ, которые требуют повышенных привилегий для выполнения. Эти файлы также не входят в стандартный набор поставляемых с ОС и устанавливаются вручную или с помощью других инструментов установки. Файлы в /usr/local/sbin обычно доступны только администраторам системы.

В представленный перечень каталогов, содержащийся в переменной PATH отсутствует /opt, в данной директории располагаются дополнительные пакеты. Например, при установке программы из deb пакета, в вышеперечисленные каталоги помещается файл ссылающийся на исходный код (символьная ссылка), который располагается в /opt. Но и как почти во всех правилах есть исключения, и они связаны с термином «тарбол», который представляет собой архив в формате tar, tar.gz и др. Он содержит в себе все необходимые зависимости, исполняемый файл и др. - все то, что необходимо для запуска программы. Ключевая особенность использования тарболов в ОС Linux заключается в том, что эти файлы при разархивировании могут находиться в любой части файловой системы и запускаться только при прямом обращении, тем самым, находиться вне пределов стандартных каталогов, перечисленных выше, что свидетельствует о человеческом факторе и невозможности контроля всего установленного ПО. Для преодоления данной неопределенности за правило необходимо взять администраторам создание символьных ссылок на исполняемый файл, входящий в тарбол. Основой для сбора данных об использовании файлов в ОС Linux является анализ метаданных. На пользовательском уровне информация предоставляется при помощи встроенной утилиты командной строки stat.

Ее работа основывается на одноименном системном вызове `stat()`, который возвращает атрибуты файла для индексного дескриптора (`Inode`) и включает в себя следующие свойства: **atime** (время последнего доступа); **mtime** (время последней модификации); **ctime** (время последнего изменения статуса).

Для достижения цели статьи, выявление неиспользованного ПО в ОС Linux, свойство `atime` является определяющим. Время доступа `atime` показывает, когда в последний раз осуществлялся доступ к файлу и/или каталогу напрямую при помощи процесса в ОС или через утилиты командной строки. Согласно своему предназначению, атрибут `atime` должен обновляться (то есть записываться на диск) каждый раз, при обращении, даже если это была просто операция чтения. При высоких нагрузках `atime` может серьезно влиять на производительность файловых систем, особенно на жесткие диски в отличие от твердотельных накопителей. В связи с вышеизложенным поведением `atime` были придуманы различные опции монтирования файловых систем, связанные со стратегиями функционирования ОС Linux в целом [6-8].

Существуют следующие: **strictatime** – всегда обновляет время доступа; **relatime** – выборочное обновление времени; **nodiratime** – не обновляется время доступа для каталогов; **noatime** – никаких обновлений времени доступа для чего-либо.

Опция `relatime` является наиболее популярной и используется по умолчанию при монтировании, поэтому рассмотрим ее подробнее. Концептуально постоянная перезапись метаданных осуществляет дополнительную нагрузку, что разработчики ОС посчитали излишним. Для экономии ресурсов определились, что по умолчанию метаданные всех файлов будут меняться в течении 24 часов одновременно. Это улучшит производительность системы, особенно на носителях с ограниченным числом циклов записи. Данное поведение и характеризуется режимом `relatime`, но при создании файловых систем его можно изменить, указанием представленных выше опций.

Метаданные о времени доступа к файлу (`atime`) в режиме `relatime`, обновляются в следующих случаях:

1. Предыдущее значение `atime` старше, чем текущее значение `mtime` (время последней модификации файла) или `ctime` (время последнего изменения состояния файла);
2. `Atime` не обновлялось в течение определённого периода времени (по умолчанию 24 часа). Если предыдущее время доступа (`atime`) отстает более чем на 24 часа назад.

Это означает что, если вы часто обращаетесь к файлу, `atime` будет обновляться не при каждом доступе, а с интервалом в день или при изменении файла, что снижает нагрузку на файловую систему. Опция `relatime` включена по умолчанию в большинстве современных дистрибутивов Linux и является компромиссом между `noatime`, который полностью отключает обновление `atime`, и ранее используемым стандартом `strictatime` который обновлял `atime` при каждом доступе к файлу. Особенности изменения метаданных файловых систем в ОС семейства Linux и в целом их функционирования, позволили выделить требования для создания ПО поиска неиспользуемых исполняемых файлов. К ним относятся: простота использования, минималистичность, функциональность, интуитивно понятный интерфейс, быстрая установка и перенос в виде скрипта.

**Обсуждение результатов.** Разработанное ПО состоит из двух подсистем, подсистема взаимодействия с пользователем, подсистема сбора и анализа метаданных файлов. Подсистема взаимодействия с пользователем предоставляет справочную информацию о предназначении установленного ПО, об опциях функционирования ОС, позволяет вводить установочную информацию для поиска необходимых метаданных по дате использования и получать рекомендации для удаления ПО. На первоначальном этапе происходит сканирование файловой системы для получения опций монтирования при помощи команды «`mount | grep " / "`» и предоставляется справочная информация по общему количеству исполняемых файлов, находящихся в каталогах переменной PATH (рис. 1). Следующим шагом пользователю доступна справка о предназначении данных каталогов и предлагается ввести дату старше которой будет произведено сканирование исполняемые файлы (рис. 2).

```
xub@xub:~/nupil$ python main test.py
##### NUPIL #####
\n(\u2013)\u2013/ nupil - предназначен для поиска неиспользуемых или последних
исполняемых файлов в *nix операционных системах
Нажмите любую клавишу для продолжения
+++++
Ваш режим доступа к дискам
/dev/sda2 on / type ext4 (rw,relatime,errors=remount-ro)
+++++
Введите 'a' или 'A' для получения справки о режимах доступа к дискам: a
Опции монтирования дисков
Каталоги PATH и количество исполняемых файлов в них
Path: /usr/local/sbin | Number files: 0
Path: /usr/local/bin | Number files: 0
Path: /usr/sbin | Number files: 385
Path: /usr/bin | Number files: 1489
Path: /sbin | Number files: 385
Path: /bin | Number files: 1489
Path: /usr/games | Number files: 0
Path: /usr/local/games | Number files: 0
Path: /snap/bin | Number files: 4
Total file: 3752
```

Рис. 1 – Сводная справка по файловой системе  
 Fig. 1 – Summary of the file system

```
Введите 'a' или 'A' для получения справки о предназначении каталогов переменной PATH, или любую другую клавишу для продолжения:
Продолжаем

Для определяния неиспользуемых бинарных файлов введите
ДАТУ, старше которой произвести сканирование
Enter a year: 2022
Enter a month: 6
Enter a day: 1
Вы ввели дату 2022-06-01
Нажмите любую клавишу для выполнения сканирования
```

Рис. 2 – Ввод данных  
 Fig. 2 – Data entry

Подсистема сбора и анализа метаданных файлов на первоначальном этапе выполняет поиск исполняемых файлов согласно указанных пользователем критериев. На следующем этапе происходит предобработка с целью формирования необходимых данных для предоставления пользователю, в удобочитаемом формате. Результатом является структура в виде абсолютного пути до исполняемого файла, дата последнего обращения, размер и каталог его расположения из переменной PATH (рис. 3). Результатом сканирования является отчет о существующих исполняемых файлах, обращение к которым осуществлялось раньше, чем введенная дата пользователем (рис 4).

```
Файл: /bin/xlsfonts 2020-02-29 32K /bin
Файл: /bin/xmag 2020-02-29 56K /bin
Файл: /bin/xman 2020-02-29 92K /bin
Файл: /bin/xmessage 2020-02-29 32K /bin
Файл: /bin/xmodmap 2018-03-19 44K /bin
Файл: /bin/xmore 2020-02-29 24K /bin
Файл: /bin/xrandr 2018-03-19 72K /bin
Файл: /bin/xrefresh 2018-03-19 16K /bin
Файл: /bin/xset 2018-03-19 40K /bin
Файл: /bin/xsetmode 2018-03-19 16K /bin
Файл: /bin/xsetpointer 2018-03-19 16K /bin
```

Рис. 3 – Сводная справка по файловой системе  
 Fig. 3 – Summary of the file system

```
Вы ввели дату 2023-01-01
Нажмите любую клавишу для выполнения сканирования
Выполняется сканирование...
/home/mywork/.local/bin 0
/home/mywork/.local/bin 0
/usr/local/sbin 0
/usr/local/bin 0
/usr/sbin 71
/usr/bin 398
/sbin 71
/bin 398
/usr/games 41
/usr/local/games 0
/snap/bin 0
Сканирование успешно выполнено.
Общее количество неиспользованных бинарных файлов = 979
```

Рис. 4 – Результат сканирования по каталогам в PATH  
 Fig. 4 – Result of scanning directories in PATH

На следующем этапе снова осуществляет работу подсистема взаимодействия с пользователем, которая позволяет просмотреть результаты сканирования при помощи выбора каталога и указания исполняемого файла, который требуется проанализировать (рис. 5).

```
Для получения информации по конкретному пакету введите абсолютный путь
Например /sbin/update-xmlcatalog : /usr/bin/htop
+++++
Пакет предназначен
htop (1)
-----
Зависимости пакета
linux-vdso.so.1 (0x00007fff7d3de000)
libncursesw.so.6 => /lib/x86_64-linux-gnu/libncursesw.so.6 (0x00007f43a3b59000)
)
libtinfo.so.6 => /lib/x86_64-linux-gnu/libtinfo.so.6 (0x00007f43a3b29000)
libm.so.6 => /lib/x86_64-linux-gnu/libm.so.6 (0x00007f43a39da000)
libc.so.6 => /lib/x86_64-linux-gnu/libc.so.6 (0x00007f43a37e0000)
libld.so.2 => /lib/x86_64-linux-gnu/libld.so.2 (0x00007f43a37e2000)
/lib64/ld-linux-x86-64.so.2 (0x00007f43a3bdf000)
+++++
Для получения зависимостей принадлежащих пакету можно использовать дополнительную команду
apt-cache depends --recurse --no-recommends --no-suggests --no-conflicts --no-breaks
--no-replaces --no-enhances htop | grep "\w" | sort -u
+++++
Для удаления исполняемого файла рекомендуется использовать менеджеры пакетов
apt, dpkg, snap и др.
apt remove htop
dpkg -g htop - оставляет файлы конфигурации
dpkg -purge htop - удаляет файлы конфигурации
snap remove htop
+++++
Для просмотра всех файлов принадлежащих пакету
whereis htop
locate htop
Понадобятся права суперпользователя
find / -name htop
Нажмите любую клавишу для завершения работы программы
\n(\u2013)\u2013/
##### NUPIL #####
```

Рис. 5 – Рекомендации по удалению неиспользованного исполняемого файла  
 Fig. 5 – Recommendations for deleting an unused executable file

В отчете по конкретному исполняемому файлу предоставляется укороченная справка по выборному исполняемому файлу, списку зависимостей, рекомендации по способам удаления через менеджеры пакетов, а также полезные команды для углубленного изучения артефактов пакета, располагаемых в ОС. В отличие от существующего ПО deborphan и его графического аналога gtkorphan, которые направлены на удаление зависших зависимостей. Представленное в статье решение позволяет контролировать существование исполняемых файлов в зависимости от времени их последнего использования или изменения. В связи с этим разработанная программа может дополнять сторонние разработки.

Автор предполагает возможное использование асинхронных подходов к программированию, но не преследует целью использование сторонних библиотек для дополнительного увеличения кодовой базы. В связи с этим представленное программное решение в статье увеличит время использования, чем можно пренебречь в связи небольшим объёмом сканирования объектов файловой системы. Но, с другой стороны, позволит быстро переносить разработанное ПО. Для его корректного функционирования необходим только Python, который предустановлен почти на всех дистрибутивах Linux.

Одним из вариантов применения разработанного ПО в ОС Linux могут считаться контейнеризированные среды на примере Docker. Их преимуществом в контексте представленных результатов будет являться полная изоляция от хостовой системы, что при увеличении кодовой базы может быть востребовано [9-11]. На рис. 6 представлен Dockerfile, позволяющий осуществить сборку контейнера. На рис. 7 скрипт развертывания и запуска контейнера, особенность которого заключается в добавлении манифест файла в скрипт. Этот изысканный подход обеспечит динамическое добавление каталогов, находящихся в переменной PATH (в связи с тем, что их количество на разных системах может отличаться).

```
FROM ubuntu:24.04

RUN apt-get update -y
RUN apt-get install -y python3.12
RUN ln -s /usr/bin/python3.12 /usr/bin/python

WORKDIR /nupil_mount
RUN mkdir /nupil_mount/nupil

COPY main.py /nupil_mount/nupil
```

Рис. 6 – Dockerfile для сборки образа  
Fig. 6 – Dockerfile for building the image

```
#!/bin/bash
path_content=$PATH

IFS=';' read -ra path_segments <<< "$path_content"
buildComposeYaml() {
  cat <<HEADER
  version: '3'
  services:
    nupil:
      image: nupil_ubuntu:0.0.4
      # command: python /nupil_mount/nupil/main.py
      tty: true
      volumes:
        HEADER
        for i in "${path_segments[@]}; do
          cat <<BLOCK
          - $i:/nupil_mount:$i:rw
        BLOCK
      done
  }
  buildComposeYaml | docker-compose -f- "$@" up
```

Рис. 7. – Скрипт развертывания и запуска контейнера  
Fig. 7. – Script for deploying and launching a container

**Вывод.** Предполагается, что пользователь использует программу в личных целях для улучшения качества администрирования. ПО предоставляет рекомендации по оптимальному использованию исполняемых файлов в ОС Linux. Тестирования происходило в ОС RedHat и Debian. Исходный код располагается по адресу <https://github.com/anton-holmes/nupil.git>. Стоит отметить, что разработка не подходит к использованию вместе с декларативными менеджерами пакетов типа Nix [12].

Перспективным направлением развития, представленного ПО может считаться создание исполняемого файла на языке Golang с оконным интерфейсом и дополнительными функциональными возможностями [13]. Перспективным направлением развития исследования является автоматизация сборки ОС с учетом включения в нее только тех исполняемых файлов, которые необходимы для ее минимального функционирования с учетом выполнения всех поставленных перед ОС задач. Полученные результаты могут быть использованы в научной деятельности, связанной с оценкой функционирования и качества ОС, а также в практической связанной с администрированием информационных систем.

#### Библиографический список:

1. Chavan M.P., Chavan P.M. Rpm packaging for Ansible automation configuration management in Linux // Interantional journal of scientific research in engineering and management. 2022. Т. 06. № 12. P. 1–3
2. Irons L.G., Irons M.A. Terraform sustainability assessment framework for bioregenerative life support systems // Frontiers in Astronomy and Space Sciences. 2021. Т. 8. С. 789563.
3. Кривцова И.Е., Салахутдинова К.И., Юрин И.В. Метод идентификации исполняемых файлов по их сигнатурам // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2016. № 1 (35). С. 215–224.

4. Орещенков И. Запуск современных программ на устаревшем дистрибутиве Linux // Системный администратор. 2018. № 12 (193). С. 22–28.
5. Жеряков Д.В. Базовые пакеты по, необходимые для организации работы пользователя Linux // Сборник: Саратовская область: традиции, инновации, стратегии лидерства. Сборник научных трудов Всероссийской научно-практической конференции студентов, магистрантов, аспирантов, посвященной 80-летию Саратовской области. В 2-х частях. 2016. С. 194–195.
6. Пантелеев Н.Н., Панов С.С., Матвеев А.В. Сравнение характеристик и возможностей современных файловых систем Linux: EXT4, XFS, BTRFS // E-Scio. 2022. № 11 (74). С. 125–140.
7. Díaz A.F., Anguita M., Camacho H.E., Nieto E., Ortega Ju. Two-level hash/table approach for metadata management in distributed file systems // The Journal of Supercomputing. 2013. Т. 64. № 1. С. 144–155.
8. URL: <https://www.unixtutorial.org/atime-ctime-mtime-in-unix-fileystems/>
9. Chae M.S., Lee H.M., Lee K. A. Performance comparison of Linux containers and virtual machines using Docker and Kvm // Cluster Computing. 2019. Т. 22. № Suppl. 1. С. 1765–1775.
10. Захарченок В.Ф., Бизюк А.Н. Контейнеризация и развертывание приложений с помощью Docker и Docker-compose // В сборнике: Материалы докладов 56-й международной научно-технической конференции преподавателей и студентов. в двух томах. Витебск, 2023. С. 80–82.
11. Громов Н.Д., Платошин А.И. Применение Docker при разработке ПО // Моя профессиональная карьера. 2024. Т. 2. № 60. С. 229–232.
12. Киселёв Д.В., Харламов Д.А. Работа пакетного менеджера Nix // В сборнике: Молодежь и научно-технический прогресс. Сборник докладов XV международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. В 2-х томах. Сост.: Е.Н. Иванцова, В.М. Уваров [и др.]. Губкин, 2022. С. 139–142.
13. Нагаев М.Т., Кожевникова А.В. Анализ эффективности реализации программ на go lang // В сборнике: Новые информационные технологии и системы (НИТиС-2023). Сборник научных статей по материалам XX Международной научно-технической конференции, посвященной 80-летию Пензенского государственного университета. Пенза, 2023. С. 160–168.
14. Корнеев В.В. Администрирование Linux. Серверное оборудование. - СПб.: БХВ-Петербург, 2021. - 560 с. ISBN 978-5-9775-6635-4.
15. Немет Э., Снайдер Г., Хейн Т.Р. Unix и Linux. Руководство системного администратора. 4-е изд. - М.: Вильямс, 2020. - 1312 с. ISBN 978-5-8459-2109-3.
16. Собель М. Linux. Администрирование и системное программирование. - М.: Вильямс, 2021. - 1088 с. ISBN 978-5-8459-2108-6.
17. Родригес К., Фишер Г., Смолка С. Python и анализ данных. - М.: ДМК Пресс, 2021. - 482 с. ISBN 978-5-97060-799-4.
18. Робачевский А.М. Операционная система UNIX. 2-е изд. - СПб.: БХВ-Петербург, 2020. - 656 с. ISBN 978-5-9775-4099-6.

#### References:

1. Chavan M.P., Chavan P.M. Rpm packaging for Ansible automation configuration management in Linux // International journal of scientific research in engineering and management. 2022; 6.(12):1–3.
2. Irons L.G., Irons M.A. Terraform sustainability assessment framework for bioregenerative life support systems. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*. 2021; 8:789563.
3. Krivtsova I.E., Salakhutdinova K.I., Yurin I.V. Method of identification of executable files by their signatures. *Bulletin of the Admiral S.O. Makarov State University of Maritime and Inland Shipping*. 2016;1(35): 215–224.
4. Oreshchenkov I. Running modern programs on an outdated Linux distribution. *System administrator*. 2018; 12 (193): 22–28.
5. Zheryakov D.V. Basic software packages necessary for organizing the work of a Linux user // Collection: Saratov region: traditions, innovations, leadership strategies. Collection of scientific papers of the All-Russian scientific and practical conference of students, master's students, and postgraduate students dedicated to the 80th anniversary of the Saratov region. In 2 parts. 2016:194–195.
6. Panteleev N.N., Panov S.S., Matveev A.V. Comparison of characteristics and capabilities of modern Linux file systems: EXT4, XFS, BTRFS. *E-Scio*. 2022;11 (74):125–140. (In Russ).
7. Díaz A.F., Anguita M., Camacho H.E., Nieto E., Ortega Ju. Two-level hash/table approach for metadata management in distributed file systems. *The Journal of Supercomputing*. 2013; 64(1):144–155.
8. URL: <https://www.unixtutorial.org/atime-ctime-mtime-in-unix-fileystems/>
9. Chae M.S., Lee H.M., Lee K. A. Performance comparison of Linux containers and virtual machines using Docker and Kvm. *Cluster Computing*. 2019;22(Suppl.1):1765–1775.
10. Zakharchonok V.F., Bizyuk A.N. Containerization and deployment of applications using Docker and Docker-compose // In the collection: Proceedings of the 56th international scientific and technical conference of teachers and students. in two volumes. Vitebsk, 2023. pp. 80–82.
11. Gromov N.D., Platoshin A.I. Using Docker in software development. *My professional career*. 2024;2(. 60): 229–232.

12. Kiselev D.V., Kharlamov D.A. Work of the Nix package manager // In the collection: Youth and scientific and technological progress. Collection of reports of the XV international scientific and practical conference of students, graduate students, and young scientists. In 2 volumes. Comp.: E.N. Ivantsova, V.M. Uvarov [et al.]. Gubkin, 2022;139–142.
13. Nagaev M.T., Kozhevnikova A.V. Analysis of the efficiency of program implementation in golang // In the collection: New information technologies and systems (NITiS-2023). Collection of scientific articles based on the materials of the XX International scientific and technical conference dedicated to the 80th anniversary of Penza State University. Penza, 2023:160–168.
14. Korneev V.V. Linux Administration. Server equipment. - St. Petersburg: BHV-Petersburg, 2021:560 p. ISBN 978-5-9775-6635-4.
15. Nemeth E., Snyder G., Hein T.R. Unix and Linux. System Administrator's Guide. 4th ed. - Moscow: Williams, 2020:1312. ISBN 978-5-8459-2109-3.
16. Sobel M. Linux. Administration and system programming. - Moscow: Williams, 2021; 1088. ISBN 978-5-8459-2108-6.
17. Rodriguez C., Fisher G., Smolka S. Python and data analysis. - Moscow: DMK Press, 2021; 482. ISBN 978-5-97060-799-4.
18. Robachevsky A.M. Operating system UNIX. 2nd ed. - SPb.: BHV-Peterburg, 2020: 656 ISBN 978-5-9775-4099-6. (In Russ).

**Сведения об авторе:**

Попов Антон Дмитриевич, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизированных информационных систем органов внутренних дел; anton.holmes@mail.ru

**Information about the author:**

Anton D. Popov, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Department of automated information systems of internal organs; anton.holmes@mail.ru.

**Конфликт интересов/Conflict of interest.**

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

**Поступила в редакцию/ Received 15.07.2025.**

**Одобрена после рецензирования/Revised 30. 08.2025.**

**Принята в печать /Accepted for publication 24.10.2025.**

## Разработка алгоритма и программного обеспечения для оценки альтернатив на основе метода аддитивной свертки критериев

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 алгоритма и программного обеспечения для оценки альтернатив на основе метода аддитивной свертки критериев. **Метод.** Метод аддитивной свертки позволяет суммировать частные критерии с учетом их важности, формируя единое интегральное значение; алгоритм расчета, включающий последовательные шаги, нормализацию, определение весов и интеграцию полученных данных; разработанный программный продукт, выполненный на языке программирования Python с использованием библиотеки Tkinter, обеспечивающий удобное графическое представление результата. **Результат.** Представлены ключевые этапы реализации метода, включающие нормализацию критериев, определение весов важности и процедуру свертки, позволяющую объединить разнородные показатели в единый интегральный показатель. В алгоритме описаны используемые функции расчетов и приведен листинг кода. Представлен алгоритм для разработки программного обеспечения. Приведен реальный пример применения метода для оценки эффективности антигистаминных препаратов, демонстрирующий возможность выбора оптимального варианта. **Вывод.** Данная программа позволяет вести удобный и быстрый расчет интегральных показателей и находить веса критериев по матрице попарных сравнений, а также представлять результат в виде графика. Предложенный метод и разработанный программный комплекс представляют эффективное средство для специалистов, занимающихся принятием решений в ситуациях, связанных с выбором оптимальной альтернативы. Использование программного продукта существенно упрощает процессы сравнения и анализа большого количества факторов, повышая точность и объективность конечного выбора.

**Ключевые слова:** алгоритм, программа, альтернативы, критерии, аддитивная свертка, интегральная модель, оценка

**Для цитирования:** С.В. Разумников. Разработка алгоритма и программного обеспечения для оценки альтернатив на основе метода аддитивной свертки критериев. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025;52(4):126-136. DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-4-126-136

## Development of an Algorithm and Software for Evaluating alternatives based on the Method of additive Convolution of Criteria

S.V. Razumnikov

Yurga Technological Institute (branch) of the National Research Tomsk Polytechnic University,  
26 Leningradskaya Str., Yurga 652055, Russia

**Abstract. Objective.** The aim of the study is to develop an algorithm and software for evaluating alternatives based on the additive convolution method of criteria. **Method.** The additive convolution method allows summing up individual criteria based on their importance, forming a single integral value; the calculation algorithm includes sequential steps, normalization, determination of weights, and integration of the obtained data; the developed software product, implemented in the Python programming language using the Tkinter library, provides a convenient graphical representation of the result. **Result.** The stages of the method implementation are presented, including normalization of criteria, determination of importance weights, and the

convolution procedure that combines different indicators into an integral indicator. The algorithm describes the calculation functions and provides a code listing. An algorithm for software development is presented. An example of applying the method to assess the effectiveness of antihistamines is given. **Conclusion.** The program allows calculating integral indicators and finding criterion weights using a pairwise comparison matrix, as well as presenting the result in the form of a graph. The proposed method and the developed software package represent an effective tool for decision-making with the selection of the optimal alternative. Using the software product simplifies the process of comparing and analyzing a large number of factors, increasing the accuracy and objectivity of selection.

**Keywords:** algorithm, program, alternatives, criteria, additive convolution, integral model, evaluation

**For citation:** S.V. Razumnikov. Development of an Algorithm and Software for Evaluating alternatives based on the Method of additive Convolution of Criteria. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2025; 52(4):126-136. (In Russ) DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-4-126-136

**Введение.** Современный мир требует от нас постоянного принятия решений в самых разнообразных областях, будь то экономика, инженерия, медицина или социальные науки. Зачастую эти решения сопровождаются необходимостью оценивать множество альтернатив, каждая из которых характеризуется набором критериев. В таких случаях традиционный подход, основанный на простом сравнении численных значений, оказывается недостаточным, так как не учитывает относительную важность критериев и взаимодействие между ними. Аддитивная свертка критериев предлагает универсальный метод, позволяющий объединить разнородные показатели в единую интегральную оценку, тем самым облегчая принятие обоснованных решений [1-3].

**Постановка задачи.** Основной целью исследования является разработка алгоритма и программного обеспечения для оценки альтернатив на основе метода аддитивной свертки критериев. Рассмотрены ключевые аспекты этого метода, включая нормализацию критериев, определение весов важности и процедуру свертки [4]. Особое внимание уделено вопросам реализации и тестирования разработанной системы, а также обсуждению примеров применения в различных практических ситуациях. Предлагаемое решение призвано стать мощным инструментом для лиц, принимающих решения, помогая им делать осознанные и обоснованные выборы среди множества вариантов.

**Методы исследования.** Аддитивная свертка значений частных критериев предполагает суммирование значений частных критериев для каждой альтернативы. Этот метод применяется, когда критерии не зависят друг от друга и могут быть измерены в одних и тех же единицах. Каждый критерий имеет свой вес, который отражает его важность. Преимущества аддитивной свертки включают простоту расчетов и понимание результатов. Однако, недостатком этого метода является то, что он не учитывает возможные взаимодействия между критериями [5].

Аддитивная свертка значений частных критериев – это методология, которая используется для объединения нескольких критериев или параметров в одно общее значение. При этом каждый критерий имеет определенную важность или вес, который учитывается при их суммировании. Такой подход позволяет учитывать различные аспекты при принятии решений и оценке различных альтернатив [6].

Процесс аддитивной свертки значений частных критериев обычно включает в себя несколько этапов: определение критериев, их взвешивание, оценку альтернатив по каждому критерию, суммирование результатов и выбор наилучшей альтернативы. Этот метод часто используется в принятии решений в условиях неопределенности или при наличии множества критериев, которые нужно учитывать одновременно. Он помогает структурировать процесс принятия решения и обеспечивает более объективную оценку возможных вариантов действий. Для того чтобы рассчитать свертку, необходимо провести следующие шаги [7, 8]:

1. Определить измеряемый объект или характеристику, для которой проводится сравнение результатов измерений.
2. Провести измерения или оценку альтернатив по выбранной шкале.
3. Рассчитать разность между результатами измерений каждого метода для каждого объекта или характеристики.
4. Проанализировать полученные разности и определить степень их согласованности.
5. Для расчёта аддитивной свертки можно использовать различные статистические методы, такие как коэффициент корреляции, среднеквадратичное отклонение, среднее значение разностей и т. д.

Таким образом, аддитивная свертка позволяет оценить согласованность результатов измерений различных методов и принять обоснованное решение об их использовании для конкретной задачи или цели, позволяет проводить более глубокий анализ данных и делать выводы о связях между переменными или их изменчивости. Определение наилучшей альтернативы вычисляется по формуле (1) [9]:

$$q_i = \sum_{j=1}^m v_j q_{ij} \quad (1)$$

$q_i$  – интегральная оценка  $i$ -го объекта,  
 $q_{ij}$  – оценка  $i$ -го объекта по  $j$ -тому частному критерию,  
 $v_j$  – вес  $j$ -го критерия.

Интегральная оценка  $i$ -го объекта – это процесс, при котором все характеристики и параметры данного объекта учитываются и вычисляются для получения комплексного представления о его качестве и ценности. Для его нахождения проводится анализ всех доступных данных, оцениваются все аспекты объекта, включая его основные характеристики, состояние, возможности для оптимизации и дальнейшего развития. Интегральная оценка позволяет сделать выводы о том, насколько объект соответствует заявленным требованиям и ожиданиям, а также определить потенциал для его улучшения [10-14].

Проанализировав рынок антигистаминных препаратов (АГП), возьмем восемь препаратов различного поколения (первого, второго и третьего). Это димедрол, тавегил, диазолин, супрастин, лоратадин, цетиризин, дезлоратадин, левоцитиризин. Для данных препаратов определены критерии, выберем из них 5 наиболее важных. Это длительность действия в часах, время наступления эффекта в минутах, противогистаминная активность в баллах, объединим влияние на центральную нервную систему, желудочно-кишечный тракт (ЖКТ) и сердечно сосудистую систему (ССС), полученные в результате клинических испытаний, в один критерий и последний критерий – это цена в рублях.

В табл.1 указаны выбранные препараты и критерии, соответствующие им в соответствии с инструкциями для применения препаратов. Данное решение в этом методе принимает ЛПР – лицо принимающее решение, определяет степень важности критериев.

**Таблица 1. Основные показатели существенных признаков альтернатив**  
**Table 1. Key indicators of essential features of alternatives**

| Фармокологические свойства (критерии) Pharmacological Properties (criteria) | Препараты /drugs  |                                |                           |                             |  |                              |                                    |                                      |
|---|---|--------------------------------|---------------------------|-----------------------------|--|------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|
|   | Димедрол (П1)<br>Diphenhydramine  | Тавегил (П2)<br>Tavegil        | Диазолин (П3)<br>Diazolin | Супрастин (П4)<br>Suprastin | Лоратадин (П5)<br>Loratadine                         | Цетиризин (П6)<br>Cetirizine | Дезлоратадин (П7)<br>Desloratadine | Левоцитиризин (П8)<br>Levocetirizine |
| Поколение   | 1-е   | 1-е                            | 1-е                       | 1-е                         | 2-е  | 2-е                          | 3-е                                | 3-е                                  |
| Длительность действия в часах   | 4-6   | 8-12                           | 24-48                     | 6-8                         | 24   | 24                           | 24                                 | 24                                   |
| Время наступления эффекта, мин  | 15-30   | 20-30                          | 15-30                     | 15-30                       | 30   | 10                           | 20-30                              | 12                                   |
| Противогистаминная активность   | ++  | +++                            | ++                        | +++                         | ++   | ++                           | +++                                | +++                                  |
| Влияние на центральную нервную систему                                      | Седативное. Снотворное  | Умеренно выраженное седативное | Выраженное седативное     | Незначительное седативное   | Незначительное седативное                            | Незначительное седативное    | Не вызывает седативного эффекта    | Не вызывает седативного эффекта      |
| Влияние на ЖКТ  | Головокружение, сонливость, торможение психической активности, снижение работоспособности, внимания, оказывает влияние на вождение автомобиля |                                |                           |                             | Не влияют на нервную систему. Не вызывают сонливости |                              |                                    |                                      |
| Влияние на СССР   | Значительное  |                                |                           |                             | Незначительное                                       |                              |                                    |                                      |
| Цена, руб.  | 35  | 289                            | 78                        | 120                         | 53   | 92                           | 182                                | 568                                  |

Для АГП главным является скорость наступления лечебного эффекта, так как это жизненно важно для пациента и порой спасает ему жизнь. Вторым по важности является противогистаминная активность, так как это определяет эффективность препарата. Третьим критерием по важности – длительность действия. От этого зависит интервал приема лекарства пациентом. Четвёртый критерий – побочные действия, которые может вызывать прием препаратов. И последний критерий – цена препаратов.

Составим матрицу попарных сравнений. Матрица попарных сравнений – это инструмент анализа, который используется для определения относительной важности или предпочтения различных элементов в сравнении друг с другом. В рамках этого метода каждый элемент сравнивается с каждым другим элементом, и полученные результаты вносятся в матрицу для последующего анализа. Таким образом, матрица попарных сравнений позволяет структурировать и систематизировать информацию о предпочтениях или важности элементов, что помогает принимать обоснованные решения на основе этих данных. В табл. 2 представлена относительная важность для оценивания по критериям.

**Таблица 2. Шкала относительной важности**  
**Table 2. Relative importance scale**

| Уровень важности Level of importance                                     | Количественное значение Quantitative value |
|--|--|
| Равная важность Equal importance   | 1  |
| Умеренное превосходство Moderate superiority                             | 3  |
| Существенное или сильное превосходство Substantial or strong superiority | 5  |
| Значительное (большое) превосходство Considerable (major) superiority    | 7  |
| Очень большое превосходство Very great superiority                       | 9  |

Метод вычисления весомости каждого критерия, используя метод попарного сравнения, является основным для определения сравнительной значимости, представляет собой процедуру установления предпочтения объектов при сравнении всех возможных пар.

**Таблица 3. Матрица парных сравнений**  
**Table 3. Pairwise comparison matrix**

| Критерий Criterion | K1   | K2   | K3   | K4   | K5    | Среднее геометрическое Geometric mean | Вес критерия Weight of the criterion |
|--------------------|------|------|------|------|-------|---------------------------------------|--------------------------------------|
| K1                 | 1    | 3    | 5    | 7    | 9     | 3,94                                  | 0,51                                 |
| K2                 | 0,33 | 1    | 3    | 5    | 7     | 2,04                                  | 0,26                                 |
| K3                 | 0,20 | 0,33 | 1    | 3    | 5     | 1,00                                  | 0,13                                 |
| K4                 | 0,14 | 0,20 | 0,33 | 1    | 3     | 0,49                                  | 0,06                                 |
| K5                 | 0,11 | 0,14 | 0,20 | 0,33 | 1     | 0,25                                  | 0,03                                 |
|                    |      |      |      |      | Сумма | 7,72                                  | 1                                    |

Результаты сравнения всех пар объектов удобно представлять в виде матрицы. Матрицу составим в виде табл.3. Попарно сравниваем критерии. Если критерии равнозначные, в таблицу ставим 1. Если критерии неравнозначные, ставим значение исходя из таблицы 2, включая промежуточные значения. Баллы в столбце, которые находятся ниже главной диагонали находим как обратные значения, которые располагаются над главной диагональю, то есть значение в первом столбце для  $K2=1/3=0,33$  и т. д. Затем находим среднее геометрическое и весомость каждого критерия, разделив среднее геометрическое на сумму средних геометрических. Сумма коэффициентов весомости равна единице, значит расчет правильный.

1. Переводим исходные значения разных показателей в единую шкалу количественных оценок (от «плохо» до «отлично», от 1 до 10) экспертным оцениванием.
2. По каждому критерию оцениваем альтернативы и назначаем определенный балл (нормированные значения).

### 3. Рассчитываем $q_i$ и выбираем лучшую альтернативу.

В табл. 4 представлена итоговые значения балльных оценок с рассчитанным интегральным показателем. Используя метод аддитивной свертки значений частных критериев. По выбранным критериям, наибольшую интегральную оценку получил препарат третьего поколения левоцитиризин, обладающий высокой противогистаминной активностью и наименьшими побочными действиями, что важно для людей, страдающих аллергией.

**Таблица 4. Итоговая таблица балльных оценок**

**Table 4. Final score table**

| Критерий Criterion  |    | Вес  | П1   | П2   | П3   | П4   | П5   | П6   | П7   | П8   |
|---|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Длительность действия Duration of action  | K4 | 0,06 | 2    | 4    | 9    | 4    | 9    | 9    | 9    | 9    |
| Время наступления эффекта Time of onset of effect   | K1 | 0,51 | 8    | 6    | 8    | 8    | 6    | 9    | 6    | 9    |
| Противогистаминная активность Antihistamine activity  | K2 | 0,26 | 6    | 8    | 6    | 8    | 6    | 6    | 8    | 8    |
| Влияние на центральную нервную систему, ЖКТ и ССС Effect on the central nervous system, gastrointestinal tract, and cardiovascular system | K3 | 0,13 | 2    | 6    | 4    | 4    | 8    | 8    | 8    | 9    |
| Цена Price  | K5 | 0,03 | 9    | 4    | 8    | 6    | 10   | 8    | 6    | 2    |
| Интегральная оценка Integral assessment   |    |      | 6,29 | 6,28 | 6,94 | 7,10 | 6,47 | 7,97 | 6,90 | 8,44 |

Основные переменные, использованные в программе, представлены в табл. 5. К основным функциям, которые реализованы в программе, относятся:

def fill\_lower\_triangle() – функция, рассчитывающая число обратное балльной оценки и заполняющая нижний треугольник матрицы.

def calculate\_geometric\_mean() – функция, рассчитывающая вес критерия.

def instact() – функция, создающая инструкцию.

def generate\_table(tab\_frame, entry) – функция, создающая первую таблицу.

def calculate\_otn() – функция расчет интегральной оценки.

def create\_new\_tab() – функция, создающая новую таблицу.

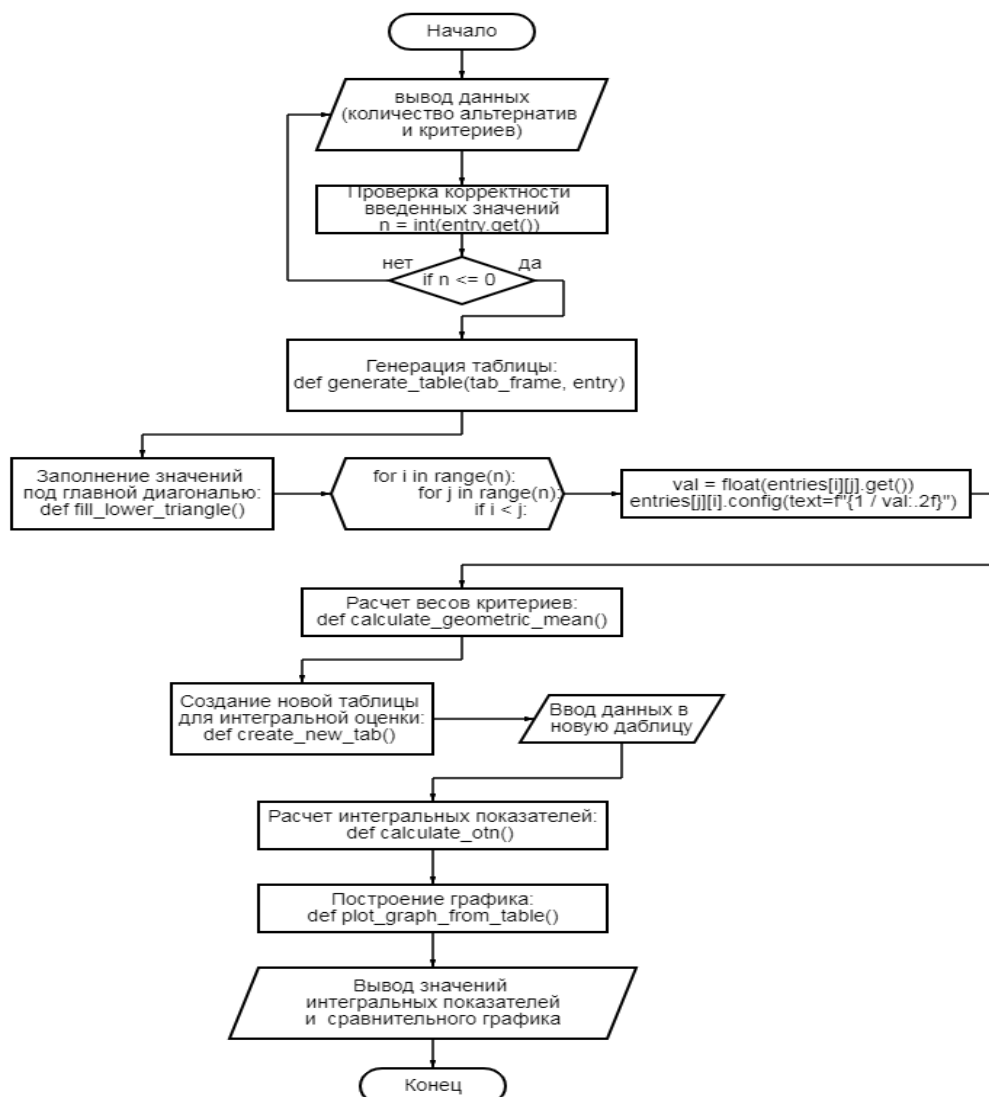
def plot\_graph\_from\_table() – функция, отвечающая за создание графика на основании таблицы.

**Таблица 5. Основные переменные программы**

**Table 5. Main program variables**

| Имя переменной Variable Name | Описание Description   |
|------------------------------|--|
| root                         | переменная, которая связана с корневым окном высшего уровня, используется для создания главного окна/ a variable that is associated with the top-level root window, used to create the main window |
| n                            | переменная, отвечающая за размер матрицы/ variable responsible for the size of the matrix  |
| val                          | балльная оценка/ score   |
| column_label                 | переменная, содержащая заголовки столбцов/ variable containing column headings   |
| row_label                    | переменная, содержащая заголовки строк/ variable containing row headings   |
| total_sum                    | сумма средних геометрических/ sum of geometric means   |
| avg_labels                   | среднее геометрическое/ geometric mean   |
| ratio                        | вес критерия/ criterion weight   |
| sum_ratio_label              | сумма весов критериев/ sum of criterion weights  |
| y                            | переменные по оси OY, соответствующие значениям из таблицы Variables on the OY axis corresponding to the values from the table   |
| x                            | переменные по оси OX, соответствующие номеру альтернативы/ Variables on the X axis corresponding to the alternative number   |
| value                        | интегральная оценка/ Integrated assessment   |

На рис. 1 представлен алгоритм для оценки альтернатив на основе метода аддитивной свертки критериев.



**Рис. 1 – Алгоритм для оценки альтернатив на основе метода аддитивной свертки критериев**  
**Fig. 1 – Algorithm for evaluating alternatives based on the additive convolution method of criteria**

**Обсуждение результатов.** На основании расчетов создадим универсальную программу для вычисления интегральной оценки частных критериев для любых критериев и альтернатив на языке Python, используя Tkinter – встроенную в стандартный пакет Python кроссплатформенную библиотеку [15-17]. Готовая программа имеет главное диалоговое окно, в котором есть набор кнопок, с помощью которых открываются дополнительные окна, содержащие таблицы для расчетов интегральных показателей и веса критериев в матрице попарных сравнений.

При запуске программы появляется главное окно, предлагающее выбрать количество заданных критериев. После внесения числа, соответствующего количеству критериев, необходимо будет нажать кнопку «Создать новую вкладку», откроется новая вкладка с таблицей, в которой необходимо заполнить матрицу попарных сравнений, затем нажать кнопку «Расчитать вес критерия». Далее необходимо выбрать количество альтернатив и нажать кнопку «Создать новую вкладку». Откроется новая вкладка с таблицей, в которой необходимо заполнить экспертные балльные оценки. После внесения данных необходимо нажать кнопку «Расчет интегральной оценки», после чего заполнится итоговая таблица. Последняя вкладка содержит график зависимости интегральной оценки от альтернативы. Обозначим  $\Pi$  – это альтернатива,  $K$  – критерий.

При написании программы был разработан алгоритм, создан макет главного окна программы, продуман удобный графический пользовательский интерфейс, прописаны функции. К важным функциям, реализующим работу в программе, можно отнести:

### 1. Функция `calculate_otn` выполняет следующие действия:

- Инициализирует сумму `summ` равной нулю.
- Перебирает каждую строку таблицы (альтернативы).
- Внутри каждой строки, для каждого столбца, считывает значения из таблицы `entries` и умножает их на соответствующие веса критериев из списка `ratios`.
- Суммирует полученные произведения и сохраняет результат в переменной `summ`.
- Обновляет соответствующий элемент в списке `results` новым значением `summ`, форматированным до двух знаков после запятой.
- Если встречается ошибка типа `ValueError` (например, если поле не является числом), отображает сообщение об ошибке.

Цель функции – рассчитать интегральные оценки для каждой альтернативы на основе введённых данных и весов критериев. Код для этой функции:

```
def calculate_otn():
    try:
        print(n, len(ratios), column_first_table)
        for i in range(n):
            summ = 0
            for j in range(column_first_table):
                value = int(entries[j][i].get())
                summ += value * round(ratios[j], 2)
            results[i].config(text=f"{summ:.2f}")
    except ValueError:
        messagebox.showerror("Ошибка",
            "Некорректное значение в таблице. Убедитесь, что все поля заполнены числами.")
```

### 2. Функция `plot_graph_from_table` выполняет следующие действия:

- Собирает данные из таблицы в список `data`.
- Создает массив `x` для оси `X` и массив `y` для оси `Y` на основе данных из таблицы.
- Строит график с маркерами, где ось `X` представляет номер альтернативы, а ось `Y` – интегральную оценку.
- Настраивает заголовок, подписи осей и добавляет легенду.
- Рисует график и вставляет его в интерфейс с помощью `FigureCanvasTkAgg`.

Кнопка «Создать график» вызывает эту функцию для визуализации данных после их расчёта. Код для этой функции:

```
def plot_graph_from_table():
    try:
        data = []
        for i in results:
            data.append(float(i.cget('text')))
        x = list(range(1, len(data) + 1))
        y = [float(value) for value in data]
        # y = [float(results) for results in data] # Значения из таблицы как ось Y
        fig, ax = plt.subplots(figsize=(5, 4))
        ax.plot(x, y, marker='o', label="Интегральная оценка")
        ax.set_title("График выбора альтернатив")
        ax.set_xlabel("Альтернативы")
        ax.set_ylabel("Интегральная оценка")
        ax.legend()
        canvas = FigureCanvasTkAgg(fig, master=root)
        canvas.draw()
        canvas.get_tk_widget().pack(side=tk.TOP, fill=tk.BOTH, expand=1, padx=10, pady=10)
    except ValueError:
        messagebox.showerror("Ошибка", "Некорректные данные для построения графика.")
    calculate_button = tk.Button(tab_frame, text="Расчёт интегральной оценки", command=calculate_otn,
        bg='#7CFC00', fg='#191970')
    calculate_button.grid(row=column_first_table + 4, column=n // 6, columnspan=n+1, pady=5)
    btn_graph = tk.Button(tab_frame, text="Создать график", command=plot_graph_from_table, bg='lightcyan',
        fg='#191970')
    btn_graph.grid(row=column_first_table + 5, column=n // 5, columnspan=n+1, pady=5)
    # btn_load = tk.Button(root, text="Инструкция", command=instact, bg='#7CFC00', fg='#191970', width=10)
    # btn_load.pack(side=tk.LEFT, padx=10, pady=10)
```

При запуске программы перед пользователем появляется главное окно «Расчет интегрального показателя». В окне вводится число, соответствующее количеству критериев. Далее нажимается кнопка «Создать новую вкладку» и появляется окно (рис. 2). Это матрица попарных сравнений. Необходимо заполнить верхний треугольник табл. на рис. 2.

|       | K1   | K2   | K3   | K4   | K5 | Средн. | Вес критерия |
|-------|------|------|------|------|----|--------|--------------|
| K1    | 1    | 3    | 5    | 7    | 9  | 3.94   | 0.51         |
| K2    | 0.33 | 1    | 3    | 5    | 7  | 2.03   | 0.26         |
| K3    | 0.20 | 0.33 | 1    | 3    | 5  | 1.00   | 0.13         |
| K4    | 0.14 | 0.20 | 0.33 | 1    | 3  | 0.49   | 0.06         |
| K5    | 0.11 | 0.14 | 0.20 | 0.33 | 1  | 0.25   | 0.03         |
| Сумма |      |      |      |      |    | 7.71   | 1.00         |

**Рис. 2 – Расчёт весов критериев**  
**Fig. 2 – Calculation of criteria weights**

Нижний треугольник таблицы заполнится автоматически после нажатия на кнопку «Заполнить нижний треугольник». Нажать на кнопку «Расчитать вес критерия». После этого заполнятся столбцы «Средн.» – это среднее геометрическое и «Вес критерия». Чтобы появилась шкала относительной важности, необходимо нажать на кнопку «Инструкция» (рис. 3).

| Уровень важности            | Количественное значение |
|-----------------------------|-------------------------|
| Равная важность             | 1                       |
| Умеренное превосходство     | 3                       |
| Существенное превосходство  | 5                       |
| Значительное превосходство  | 7                       |
| Очень большое превосходство | 9                       |

Значения 2, 4, 6, 8 - являются промежуточными

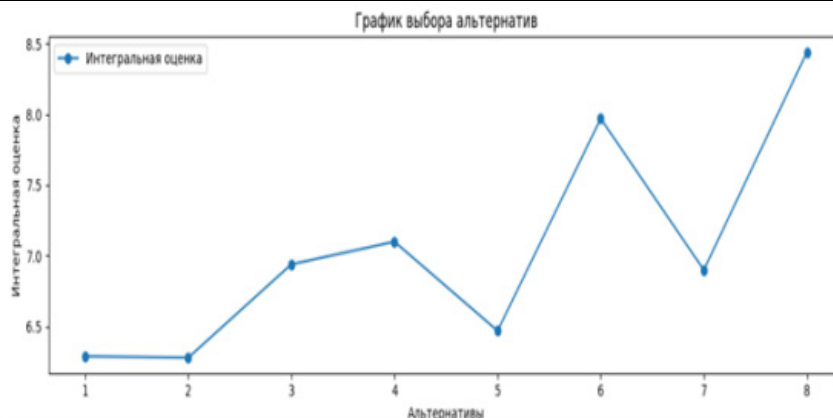
**Рис. 3 – Инструкция «Шкала относительной важности»**  
**Fig. 3 – Instruction "Relative Importance Scale"**

В окне необходимо ввести число, соответствующее количеству альтернатив. Нажав на кнопку «Создать новую вкладку», появится окно (рис. 4, таблица с экспертными оценками). Заполняется таблица в соответствии с экспертной оценкой. Числа должны быть целые, положительные, соответствовать Шкале относительной важности. Далее нажимается кнопка «Расчет интегральной оценки», после чего выполнится расчет интегральной оценки.

|                            | П1   | П2   | П3   | П4   | П5   | П6   | П7   | П8   | Вес критерия |
|----------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|--------------|
| K1                         | 8    | 6    | 8    | 6    | 6    | 9    | 6    | 9    | 0.51         |
| K2                         | 6    | 8    | 6    | 8    | 6    | 6    | 8    | 8    | 0.26         |
| K3                         | 2    | 6    | 4    | 4    | 8    | 8    | 8    | 9    | 0.13         |
| K4                         | 2    | 4    | 9    | 4    | 9    | 9    | 9    | 9    | 0.06         |
| K5                         | 9    | 4    | 8    | 6    | 9    | 8    | 6    | 9    | 0.03         |
| Расчёт интегральной оценки | 6.29 | 6.28 | 6.94 | 6.08 | 6.47 | 7.97 | 6.90 | 8.44 |              |

**Рис. 4 – Расчёт интегральной оценки**  
**Fig. 4 – Calculation of the integral assessment**

После завершения всех расчетов необходимо нажать кнопку «Создать график» (рис. 5). В окне появится график.



**Рис. 5 – График выбора альтернатив**  
**Fig. 5 – Graph of alternative selection**

Разработанная программа выполняет следующие функции:

1. Учет исходных данных для проведения оценки.
2. Расчет весов критериев методом попарных сравнений.
3. Расчет интегрального показателя для альтернативы на основе метода аддитивной свертки.
4. Построение графика по интегральной оценке.

**Вывод.** В статье представлен разработанный алгоритм и программное обеспечение для оценки альтернатив на основе метода аддитивной свертки критериев. Рассмотрены основные этапы нормализации критериев, определения весов важности и процедуры свертки, что позволило объединить разнородные показатели в единую интегральную оценку.

Реализация и тестирование показали, что предложенный метод эффективен и надежен, обеспечивая точность и прозрачность процесса принятия решений. Данный подход может успешно использоваться в различных областях, таких как экономика, инженерия и социальные науки, помогая лицам, принимающим решения, выбирать наилучшую альтернативу среди множества вариантов.

Внедрение разработанного программного обеспечения открывает новые перспективы для автоматизации и стандартизации процессов оценки и принятия решений, что особенно актуально в условиях растущей сложности и многообразия современных задач.

#### Библиографический список:

1. Аристова Е.М. Установление взаимосвязи между методами аддитивной свертки и метрики // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2017. – Т. 44. – №. 2. – С. 107-117.
2. Васильев В.П., Мельник А.О. Решение многокритериальных задач принятия решения посредством смешанной свертки критериев // Современные инновационные технологии и проблемы устойчивого развития общества. – 2018. – С. 163-168.
3. Логанина В.И. Оценка производства модифицированных сухих строительных смесей: применение метода аддитивной свертки / В. И. Логанина, Е. И. Куимова, Т. В. Учаева // Региональная архитектура и строительство. – 2014. – №. 4. – С. 171-176.
4. Осипов Г.С. Многокритериальный выбор альтернатив методом свертки нечетких чисел / Г.С. Осипов, Н.С. Вашакидзе, Г.В. Филиппова // Ceteris Paribus. – 2016. – №. 3. – С. 19-22.
5. Першин Д.А., Чигарев А.Ю. Построение аддитивной функции свертки критериев для выбора альтернативного варианта // Фундаментальные и прикладные исследования молодых учёных. – 2023. – С. 600-604.
6. Каралиев Р.С. Метод экспертных оценок для многокритериальной задачи принятия решений с применением аддитивной свертки и нестрого ранжирования критериев / Р.С. Каралиев, В. Лим, В.А. Субботин // (ППП НРК). – 2017.
7. 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.
8. 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.

9. Силич В.А., Силич М.П. Теория систем и системный анализ: Учебное пособие. – Томск: изд. ТПУ, 2010. – 97 с.
10. Стародубов А.В. Разработка инструментального средства и нечетких моделей для многокритериального выбора рациональных инвестиционных решений: дис. –, 2007.–24 с, 2007.
11. Талипов Н.Г., Катасёв А.С. Математическое и программное обеспечение для распределения заданий в автоматизированных системах электронного документооборота. – 2017.
12. Малышев И.А. Разработка интеллектуальной системы поддержки принятия экономических решений на основе методов теорий нечетких множеств //URL: <https://www.dissercat.com/content/razrabotka-intellektualnoi-sistemy-podderzhki-prinyatiya-ekonomicheskikh-reshenii-na-osnove-> (дата обращения 18.08.2022). – 2006.
13. Талипов Н.Г. Методы многокритериального принятия решений по распределению заданий в автоматизированной системе электронного документооборота территориального органа Роскомнадзора / Н.Г. Талипов, А.С. Катасёв, А.П. Кирпичников // Вестник Казанского технологического университета. – 2016. – Т. 19. – №. 12. – С. 147-152.
14. Беляева М.А. Разработка интегрированной системы поддержки принятия решений по управлению проектами в условиях неопределенности / М.А. Беляева, О.В. Буреш, Т.Н. Шаталова // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2011. – №. 13 (132). – С. 43-48.
15. 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.
16. Разумников С.В. Модели, алгоритмы и программное обеспечение поддержки принятия стратегических решений к переходу на облачные технологии: монография / С.В. Разумников // Изд-во Томского политехнического университета. - 2020. - 176 с.
17. Разумников С.В. Алгоритм для определения степени уязвимости участков облачных вычислений на основе метода ELECTRE I // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2024; 51(4):130-143. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2024-51-4-130-143>.

#### References:

1. Aristova E.M. Establishing the relationship between the methods of additive convolution and metrics. *Herald of the Dagestan State Technical University. Technical sciences.* 2017; 44 (2):107-117. (In Russ)
2. Vasiliev V.P., Melnik A.O. Solving multicriteria decision-making problems by means of mixed convolution of criteria. *Modern innovative technologies and problems of sustainable development of society.* 2018:163-168. (In Russ)
3. Loganina V.I. Evaluation of the production of modified dry building mixes: application of the additive convolution method / V.I. Loganina, E.I. Kuimova, T.V. Uchaeva. *Regional architecture and construction.* 2014; 4:171-176. (In Russ)
4. Osipov G.S. Multi-criteria selection of alternatives by the method of convolution of fuzzy numbers / G.S. Osipov, N.S. Vashakidze, G.V. Filippova. *Ceteris Paribus.* 2016; 3:19-22. (In Russ)
5. Pershin D.A., Chigarev A.Yu. Construction of an additive function of convolution of criteria for selecting an alternative. *Fundamental and applied research of young scientists.* 2023: 600-604. (In Russ)
6. Karaliev R.S. Method of expert assessments for a multi-criteria decision-making problem using additive convolution and non-strict ranking of criteria / R.S. Karaliev, V. Lim, V.A. Subbotin // (PPP NRK). – 2017. (In Russ)
7. 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. (In Russ)
8. 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. (In Russ)
9. Silich V.A., Silich M.P. Systems Theory and Systems Analysis: A Tutorial. – Tomsk: TPU Publishing House, 2010. – 97 p. (In Russ)
10. Starodubov A.V. Development of a tool and fuzzy models for multi-criteria selection of rational investment decisions: diss. 200:74 p. (In Russ)
11. Talipov N.G., Katasev A.S. Mathematical and software for distributing tasks in automated electronic document management systems. – 2017. (In Russ)
12. Malyshev I.A. Development of an intelligent system for supporting economic decision-making based on fuzzy set theory methods //URL: <https://www.dissercat.com/content/razrabotka-intellektualnoi-sistemy-podderzhki-prinyatiya-ekonomicheskikh-reshenii-na-osnove->(accessed 18.08.2022). – 2006. (In Russ)
13. Talipov N.G. Methods of multi-criteria decision-making on task distribution in the automated electronic document management system of the territorial body of Roskomnadzor / N.G. Talipov, A.S. Katasev, A.P. Kirpichnikov. *Bulletin of Kazan Technological University.* 2016; 19(12):147-152.

14. Belyaeva M.A. Development of an integrated decision support system for project management under uncertainty / M.A. Belyaeva, O.V. Buresh, T.N. Shatalova. *Bulletin of Orenburg State University*. – 2011;13 (132): 43-48. (In Russ)
15. Razumnikov S.V. Development of Software 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. (In Russ)
16. Razumnikov S.V. Models, Algorithms, and Software for Supporting Strategic Decision-Making on the Transition to Cloud Technologies: Monograph. *Publishing house of Tomsk Polytechnic University*. - 2020. - 176 p. (In Russ)
17. Razumnikov S.V. Algorithm for Determining the Degree of Vulnerability of Cloud Computing Areas Based on the ELECTRE I Method. *Herald of Dagestan State Technical University. Technical sciences*. 2024; 51(4):130-143. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2024-51-4-130-143>. (In Russ)

**Сведения об авторе:**

Разумников Сергей Викторович, кандидат технических наук, доцент, отделение цифровых технологий и безопасности; [razumnikov@tpu.ru](mailto:razumnikov@tpu.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](mailto: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 17.08.2025.**

**Одобрена после рецензирования/Revised 30. 09.2025.**

**Принята в печать /Accepted for publication 14.11.2025.**

## Цифровая трансформация: теоретико-методологический подход, драйверы и эффекты внедрения

С.Э. Савзиханова<sup>1</sup>, Т.И. Исабекова<sup>2</sup>, Н.Э. Эминова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Дагестанский государственный университет народного хозяйства,

<sup>1</sup>367008, г. Махачкала, ул. Джамалутдина Атаева, 5, Россия,

<sup>2</sup> Дагестанский государственный технический университет,

<sup>2</sup>367015, г. Махачкала, просп. Имама Шамиля, д.70, Россия

**Резюме. Цель.** Цель исследования состоит в обосновании и разработке теоретико-методологического подхода к цифровой трансформации систем на основе интеграции платформенного, компетентностного и экосистемного подходов, а также в эмпирической оценке количественных эффектов трансформации на выборке российских компаний за 2018–2023 гг. **Метод.** Используются методы системного и институционального анализа, математического моделирования (модифицированная функция Кобба–Дугласа), кейс-стади (250 компаний с фактическими данными за 2018–2023 гг. и 50 компаний с прогнозными данными за 2024–2025 гг.), корреляционно-регрессионный анализ панельных данных (Росстат, НИУ ВШЭ), а также технический анализ архитектурных решений (микросервисы, IoT, CI/CD). **Результат.** Предложена интегральная модель цифровой трансформации. На основе данных 250 компаний (2018–2023 гг.) эмпирически доказано, что системная трансформация повышает производительность труда на 18–27%, рентабельность - на 12–19%, а транзакционные издержки снижаются на 22–35%. Впервые для России количественно оценён вклад инженерных решений - платформ, цифровых двойников и ML-моделей. Прогноз по 50 компаниям (2024–2025 гг.) показывает усиление эффекта до 28–37% при масштабном внедрении GenAI и 5G. **Вывод.** Цифровая трансформация - инженерно-организационный процесс, зависящий от зрелости ИТ-архитектуры, квалификации DevOps/ML-инженеров и уровня экосистемной интеграции. Полученные результаты применимы для разработки стратегий цифровизации.

**Ключевые слова:** цифровая трансформация, платформенный подход, экосистема, цифровые компетенции, микросервисная архитектура, цифровой двойник, машинное обучение, функция Кобба–Дугласа, DevOps

**Для цитирования:** С.Э. Савзиханова, Т.И. Исабекова, Н.Э. Эминова. Цифровая трансформация: теоретико-методологический подход, драйверы и эффекты внедрения. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025;52(4):137-146. DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-4-137-146

## Digital Transformation: A Theoretical and Methodological Approach, Drivers and Effects of Implementation

S.E. Savzikhanova<sup>1</sup>, T.I. Isabekova<sup>2</sup>, N.E. Eminova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Daghestan State University of National Economy,

<sup>1</sup>5 Jamalutdin Atayev Str., Makhachkala 367008, Russia,

<sup>2</sup> Daghestan State Technical University,

<sup>2</sup> 70 Imam Shamil Ave., Makhachkala 367015, Russia

**Abstract. Objective.** The study aims to develop a theoretical and methodological approach to digital transformation based on integrating platform, competence, and ecosystem approaches and to empirically assess its quantitative effects on Russian companies during 2018–2023. **Method.** Systemic and institutional analysis, mathematical modeling (modified Cobb–Douglas

function), case studies (250 companies with actual data for 2018–2023 plus 50 companies with forecast data for 2024–2025), regression analysis of panel data (Rosstat, HSE), and technical analysis of architectures (microservices, IoT, CI/CD). **Result.** An integrated model of digital transformation is proposed. Based on actual data from 250 companies (2018–2023), systemic transformation increases labor productivity by 18–27%, profitability by 12–19%, and reduces transaction costs by 22–35%. The contribution of engineering solutions (platforms, digital twins, ML models) is quantified for Russia. Forecast data (2024–2025) indicate potential productivity effects up to 28–37% with GenAI and 5G adoption, pending verification. **Conclusion.** Digital transformation is an engineering-organizational process dependent on IT architecture maturity, DevOps/ML skills, and ecosystem integration. Findings support evidence-based digital strategies.

**Keywords:** digital transformation, platform approach, ecosystem, digital competencies, microservice architecture, digital twin, machine learning, Cobb–Douglas function, DevOps

**For citation:** S.E. Savzikhanova, T.I. Isabekova, N.E. Eminova. Digital Transformation: A Theoretical and Methodological Approach, Drivers and Effects of Implementation. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2025; 52(4):137-146. (In Russ) DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-4-137-146

**Введение.** Цифровая трансформация - императив современного экономического развития. В 2010-е годы внимание уделялось внедрению отдельных технологий («электронное правительство», IoT, Big Data), но к 2020-м стало ясно: фрагментарная цифровизация не обеспечивает устойчивого конкурентного преимущества. Требуется системная перестройка цепочки создания стоимости с использованием платформенных решений, искусственного интеллекта и робототехники.

В Российской Федерации цифровая трансформация закреплена в государственной программе «Информационное общество» и национальном проекте «Цифровая экономика Российской Федерации». Согласно данным Росстата и НИУ ВШЭ, вклад ИКТ-сектора в ВВП страны увеличился с 2,4% в 2018 году до 3,5% в 2023 году, что подтверждает значимость цифровых технологий как фактора макроэкономического роста.

Тем не менее в научной и практической литературе отсутствует целостный теоретико-методологический подход, объединяющий инженерные, организационные и компетентностные аспекты цифровой трансформации. Настоящее исследование направлено на восполнение этого пробела.

**Постановка задачи.** Современная научная литература рассматривает цифровизацию в ограниченном контексте: как внедрение ERP- и CRM-систем, развитие инфраструктуры (5G, ЦОДы) или построение платформенных бизнес-моделей. Однако большинство исследований не интегрируют инженерные, управленческие и компетентностные аспекты в единую концептуальную модель.

Главная гипотеза настоящего исследования состоит в том, что цифровая трансформация представляет собой процесс формирования новой организационной способности по созданию и удержанию стоимости в условиях цифровой экосистемы, опирающейся на платформы, компетенции и архитектурные инновации, в соответствии с которой, основными задачами исследования являются:

1. Разработать интегральную модель цифровой трансформации, объединяющую три концептуальных направления - платформенный, компетентностный и экосистемный подходы.
2. Эмпирически оценить количественные эффекты трансформации (производительность, рентабельность, транзакционные издержки) на выборке из 250 российских компаний за 2018–2023 гг.
3. Проанализировать прогнозные тренды на 2024–2025 гг. на примере 50 компаний, внедряющих GenAI, 5G и цифровые двойники.

**Методы исследования.** В исследовании применялся комплексный междисциплинарный методический подход, включающий:

1. Теоретический анализ - систематизация понятийного аппарата цифровой трансформации на основе работ отечественных и зарубежных авторов (Тис, Шваб, Каткало, Autio, Nambisan, Kenney, Zysman и др.).
2. Математическое моделирование - построение модифицированной функции Кобба–Дугласа с добавлением параметра цифровых компетенций (Digital Competencies Index, DC).
3. Кейс-стади - анализ 250 российских компаний с фактическими данными (2018–2023 гг.) и 50 компаний с прогнозными данными (2024–2025 гг.).
4. Корреляционно-регрессионный анализ - для выявления взаимосвязей между показателями эффективности (ROS, ROI, выручка) и компонентами цифровой зрелости (DC\_cloud, DC\_auto, DC\_data, DC\_sec, DC\_edu).
5. Технический аудит ИТ-архитектур - оценка степени внедрения микросервисов, CI/CD, IoT, DevOps и цифровых двойников в инженерных системах предприятий. Основу исследования составляет также методологический подход, включающий:
  1. Платформенный подход. Платформа рассматривается как ядро экосистемы, обеспечивающее масштабируемость, сетевые эффекты и сокращение транзакционных издержек. По данным исследований Gartner (2022) и НИУ ВШЭ (2024), компании, использующие платформенную архитектуру, демонстрируют на 20–30% более высокую операционную эффективность.
  2. Экосистемный подход. Экосистема цифровой трансформации формируется вокруг взаимодействия компаний, поставщиков, партнёров и клиентов на основе открытых API, совместных сервисов и интегрированных данных. Jacobides, Cennamo и Gawer (2018) подчёркивают, что устойчивость экосистемы определяется не числом участников, а степенью синхронизации потоков данных и процессов.
  3. Компетентностный подход. Цифровые компетенции (Digital Competencies) включают совокупность знаний и навыков в областях облачных технологий, автоматизации, аналитики данных, кибербезопасности и инженерного обучения персонала. Bloom, Sadun и Van Reenen (2022) доказывают, что именно компетенции, а не технологии сами по себе определяют отдачу от цифровизации.

На основе данных концептуальных направлений сформирована интегральная модель цифровой трансформации систем, объединяющая: платформенные решения (инфраструктурный слой), цифровые компетенции персонала (человеческий капитал), экосистемные связи (внешние взаимодействия и совместные данные), и представлена в виде системы трёх взаимосвязанных блоков (рис. 1).



Рис. 1 – Интегральная модель цифровой трансформации систем\*  
Fig. 1 – Integral model of digital transformation of systems\*

\*Источник: составлено авторами на основе [3–7, 12–14])

Для составления эмпирической базы исследования осуществлена выборка: 250 компаний (2018–2023 гг.) - фактические данные, использованы для регрессионного анализа; 50 компаний (2024–2025 гг.) - прогнозные и плановые данные, использованы

для сценарного анализа. Источниками фактических данных являются: открытые отчёты (60%): Росстат, НИУ ВШЭ, Минцифры РФ, корпоративные отчёты (Сбербанк, Яндекс, Лукойл, МТС, Норникель); результаты анкетирования ИТ-руководителей (25%): онлайн-опрос (ДГУНХ и НИУ ВШЭ, 2022–2024 гг.), 187 валидных ответов; экспертные интервью (15%): полуструктурированные беседы с СЮ/СТО 50 компаний (45–90 минут), анализ по методу Braun & Clarke (2006).

В качестве аналитической основы использована модифицированная функция Кобба–Дугласа, адаптированная для учёта цифровых компетенций предприятий:

$$Y_i = A \cdot K_i^\alpha \cdot L_i^\beta \cdot DC_i^\gamma \cdot e^{\varepsilon_i} \quad (1)$$

где,  $Y_i$ – выручка компании  $i$  (млн руб.);

$A$ – общая факторная производительность (TFP);

$K_i$ – капитал (млн руб.);

$L_i$ – труд (чел.-часы);

$DC_i$ – индекс цифровых компетенций (в диапазоне [0;1]);

$\alpha, \beta, \gamma$ – эластичности факторов;

$\varepsilon_i$ – случайная ошибка.

По результатам регрессионной оценки методом наименьших квадратов (МНК) на выборке 250 компаний (2018–2023 гг.), получены следующие значения эластичностей:

$$\alpha = 0.37, \beta = 0.40, \gamma = 0.23.$$

Это означает, что вклад цифровых компетенций (DC) в совокупную производительность предприятий составляет около 23 %, что сопоставимо с влиянием капитала и труда.

Для оценки цифровой зрелости предприятий разработан интегральный индекс цифровых компетенций (DC), рассчитанный как взвешенная сумма пяти компонент:

$$DC = 0.30 \cdot DC_{cloud} + 0.25 \cdot DC_{auto} + 0.20 \cdot DC_{data} + 0.15 \cdot DC_{sec} + 0.10 \cdot DC_{edu} \quad (2)$$

где:

$DC_{cloud}$ – доля инфраструктуры, функционирующей в облачных средах (Yandex Cloud, СберОблако, AWS);

$DC_{auto}$ – уровень автоматизации процессов (CI/CD, RPA, BPM);

$DC_{data}$ – зрелость аналитики и машинного обучения (Data Warehouse, Data Lake, ML Pipeline);

$DC_{sec}$ – зрелость кибербезопасности (SOC, ISO 27001, Zero Trust);

$DC_{edu}$ – доля сотрудников, прошедших обучение по направлениям DevOps, ML, облачные технологии.

Все компоненты нормированы в диапазоне [0;1] методом экспертной оценки (Delphi) с участием трёх независимых экспертов и сопоставлены с эталонными компаниями (Сбербанк, Яндекс, Лукойл). Каждая компонентная метрика DC измерялась по объективным показателям, представленным в табл. 1.

**Таблица 1. Показатели компонентной метрики DC**

**Table 1. DC component metrics**

| Компонента<br>Component | Описание Description  | Критерий оценки (0–1)<br>Evaluation Criteria (0–1) | Источники Sources                                     |
|-------------------------|---|--|---|
| DC_cloud                | Доля ИТ-инфраструктуры в облаке<br>Share of IT infrastructure in the cloud  | 1 = 100 % облачных сервисов                        | Отчёты, ИТ-интервью Reports, IT interviews            |
| DC_auto                 | Уровень автоматизации бизнес-процессов Level of business process automation | 0.75 при автоматизации 75 % финансовых операций    | Анкетирование, DevOps-отдел Survey, DevOps department |
| DC_data                 | Зрелость аналитики и ML Maturity of analytics and ML                        | 1 = предиктивная аналитика в реальном времени      | Data Science команды teams                            |
| DC_sec                  | Зрелость кибербезопасности Cybersecurity Maturity                           | 1 = полный цикл SOC + EDR/XDR                      | ISO 27001, аудиты audits                              |
| DC_edu                  | Доля сертифицированных сотрудников Percentage of certified employees        | 1 = 100 % прошли обучение                          | HR-отделы, академии                                   |

Приведем пример расчёта: Сбербанк (2023 г.):

$$DC = 0.30 \cdot 0.85 + 0.25 \cdot 0.75 + 0.20 \cdot 0.90 + 0.15 \cdot 0.80 + 0.10 \cdot 0.70 = 0.8125$$

Фактическая рентабельность продаж (ROS) = 24.8 %.

Лукойл (2023 г.):

$$DC = 0.30 \cdot 0.40 + 0.25 \cdot 0.35 + 0.20 \cdot 0.30 + 0.15 \cdot 0.40 + 0.10 \cdot 0.25 = 0.3525$$

Фактическая рентабельность продаж (ROS) = 13.5%.

Разница DC = 0.46; Прогноз прироста ROS по модели (3):

$$ROS = 6.2 + 18.7 \cdot DC \Rightarrow \Delta ROS = 18.7 \cdot 0.46 = 8.6 \text{ п.п.}$$

Фактический прирост = 11.3 п.п., что подтверждает применимость модели (расхождение  $\approx$  2.7 п.п.). Для анализа взаимосвязей между рентабельностью продаж (ROS) и компонентами DC построена матрица корреляций (табл. 2).

**Таблица 2. Матрица корреляций ROS и компонентов DC (2018–2023, N=250)**

**Table 2. Correlation matrix of ROS and DC components (2018–2023, N=250)**

| Показатель /Indicator | ROS  | DC_cloud | DC_auto | DC_data | DC_sec | DC_edu |
|-----------------------|------|----------|---------|---------|--------|--------|
| ROS                   | 1.00 | 0.68     | 0.62    | 0.73    | 0.55   | 0.60   |
| DC_cloud              | 0.68 | 1.00     | 0.58    | 0.63    | 0.52   | 0.57   |
| DC_auto               | 0.62 | 0.58     | 1.00    | 0.61    | 0.49   | 0.54   |
| DC_data               | 0.73 | 0.65     | 0.61    | 1.00    | 0.56   | 0.60   |
| DC_sec                | 0.55 | 0.52     | 0.49    | 0.66    | 1.00   | 0.51   |
| DC_edu                | 0.60 | 0.57     | 0.54    | 0.60    | 0.51   | 1.00   |

Наиболее сильная корреляция между ROS и DC\_data ( $r = 0.73$ ), что подчёркивает значение аналитики и машинного обучения. Корреляции между компонентами умеренные (0.49–0.51). Результаты анализа эффектов цифровой трансформации представлены в табл. 3.

**Таблица 3. Результаты регрессионного анализа зависимости рентабельности продаж (ROS) от индекса цифровых компетенций (DC), 2018–2023 гг., N=250**

**Table 3. Results of the regression analysis of the dependence of return on sales (ROS) on the digital competence index (DC), 2018–2023, N=250**

| Показатель/ Indicator | Линейная модель/ Linear model | Полиномиальная модель<br>Polynomial model |
|-----------------------|-------------------------------|---|
| Константа ( $\beta$ ) | 4.72*** ( $p < 0.001$ )       | 5.31*** ( $p < 0.001$ )                   |
| DC                    | 18.7*** ( $p < 0.001$ )       | 21.4*** ( $p < 0.001$ )                   |
| DC <sup>2</sup>       | —                             | -9.8** ( $p = 0.014$ )                    |
| R <sup>2</sup>        | 0.61                          | 0.67                                      |
| Средняя ошибка (MAE)  | 1.18%                         | 1.09%                                     |

Примечание: \*\*\*, \*\* - статистическая значимость на уровне 1 % и 5 % соответственно.

Note: \*\*\*, \*\* - statistical significance at the level of 1% and 5%, respectively

Регрессионный анализ проведен на основе данных 250 российских компаний (2018–2023 гг.). Проведено моделирование зависимости рентабельности продаж (ROS) от индекса цифровых компетенций (DC). Линейная регрессионная модель:

$$ROS = 6.2 + 18.7 \cdot DC (R^2 = 0.74, p < 0.001) \quad (3)$$

Увеличение DC на 0.1 приводит к росту рентабельности на 1.87 процентных пункта.

Нелинейная (полиномиальная) модель второго порядка:

$$ROS = 2.8 + 35.6 \cdot DC - 14.2 \cdot DC^2 (R^2 = 0.78, p < 0.001) \quad (4)$$

Коэффициент при DC<sup>2</sup> отрицателен, что указывает на эффект убывающей предельной отдачи – после достижения высокого уровня цифровой зрелости (DC > 0.7) рост эффективности стабилизируется. Для проверки моделей проведен тест Бреуша–Пагана:  $p = 0.31$  – гетероскедастичность отсутствует; рассчитан коэффициент инфляции дисперсии (VIF) < 2.8 – мультиколлинеарность не выявлена; определена средняя абсолютная ошибка Random Forest = 1.18%, что подтверждает устойчивость оценок.

На рис.2. представлены результаты визуализации регрессионных моделей. На рис. 2. ось X– индекс цифровых компетенций (DC, диапазон 0–1); ось Y– рентабельность продаж (ROS, %); синие точки – эмпирические данные компаний; красная линия – линейная модель (уравнение 3); выделенные точки: Сбербанк (DC=0.81, ROS=24.8%); Лукойл (DC=0.35, ROS=13.5%); Яндекс (DC=0.90, ROS=26.2%).

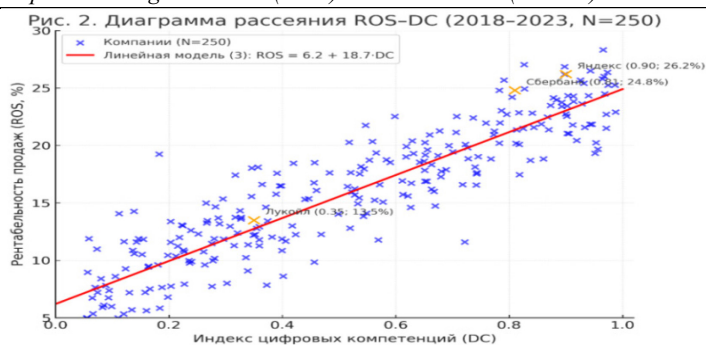


Рис. 2 – Диаграмма рассеяния зависимости ROS–DC (2018–2023 гг.).

Fig. 2 – Scatter plot of the ROS–DC relationship (2018–2023).

Результаты сравнения линейной и полиномиальной моделей представлены на рис. 3

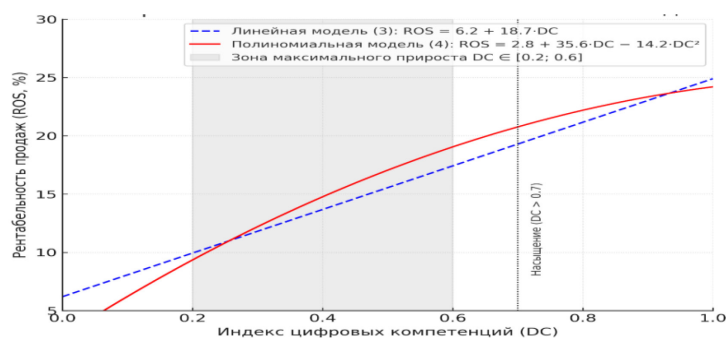


Рис. 3 – Сравнение линейной и полиномиальной моделей

Fig. 3 – Comparison of linear and polynomial models

На рис. 3. синяя пунктирная линия – линейная модель (3); красная сплошная линия – полиномиальная модель (4); область  $DC \in [0.2; 0.6]$  показывает максимальный прирост рентабельности. При  $DC > 0.7$  наблюдается насыщение, что согласуется с теорией предельной полезности. На основе фактических данных (2018–2023,  $N=250$ ) установлены средние эмпирические эффекты, представленные в табл.4

Таблица 4. Средние эмпирические эффекты

Table 4. Average empirical effects

| Показатель Indicator  | Средний прирост Average growth | Источник данных Data source |
|---|--------------------------------|-----------------------------|
| Производительность труда/ Labor productivity                        | +18–27%                        | Росстат, НИУ ВШЭ            |
| Рентабельность продаж /Sales profitability                          | +12–19%                        | Финансовые отчёты           |
| Снижение транзакционных издержек/<br>Reduction in transaction costs | +22–35%                        | Опрос СЮ, кейс-стади        |

На основании полученных данных составлен прогноз на 2024–2025 гг. по 50 компаниям: повышение производительности труда на 28–37%; повышение рентабельности на 16–24 %; снижение издержек на 32–42%. Прогноз требует верификации, поскольку основан на стратегических планах и пилотных проектах GenAI и 5G (табл.5).

Таблица 5. Расчётные и фактические показатели для Сбербанка и Лукойла (2023 г.)

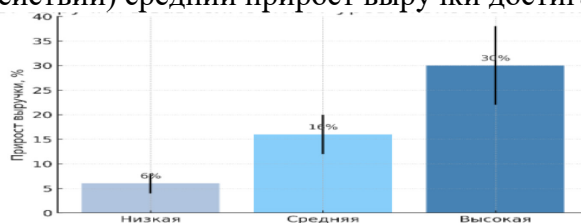
Table 5. Estimated and actual indicators for Sberbank and Lukoil (2023)

| Компания | DC_cloud | DC_auto | DC_data | DC_sec | DC_edu | DC     | ROS, % |
|----------|----------|---------|---------|--------|--------|--------|--------|
| Сбербанк | 0.85     | 0.75    | 0.90    | 0.80   | 0.70   | 0.8125 | 24.8   |
| Лукойл   | 0.40     | 0.35    | 0.30    | 0.40   | 0.25   | 0.3525 | 13.5   |

Разница  $DC = 0.46$ . Прогноз модели (3):  $18.7 \times 0.46 = 8.6$  п.п. Фактический прирост = 11.3 п.п. Расхождение 2.7 п.п. объясняется отраслевой спецификой.

**Обсуждение результатов.** Согласно экосистемному подходу (Jacobides, Cennamo & Gawer, 2018), эффективность цифровой трансформации зависит не только от зрелости внутренней ИТ-архитектуры, но и от глубины и ширины внешней интеграции.

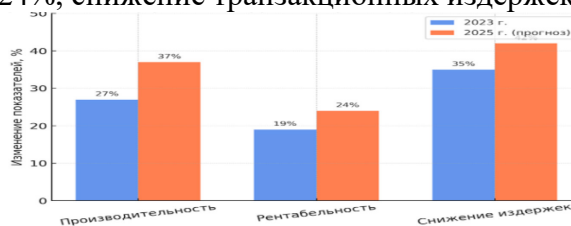
В рамках настоящего исследования уровень интеграции оценивался по количеству и качеству внешних цифровых взаимодействий: количество активных API-интеграций с партнёрами; участие в отраслевых B2B-платформах; использование государственных цифровых сервисов (например, «Госуслуги.Бизнес», СМЭВ); совместные проекты с ИТ-вендорами и стартапами. На диаграмме (рис. 4) представлены средние значения прироста выручки (%) для компаний с разным уровнем экосистемной интеграции. Компании с низким уровнем интеграции демонстрируют прирост выручки в среднем на 8–12%. При среднем уровне — прирост увеличивается до 17–21%. У высокоинтегрированных компаний ( $\geq 4$  внешних взаимодействий) средний прирост выручки достигает 26–31%.



**Рис. 4 – Средний прирост выручки в зависимости от уровня экосистемной интеграции.**

**Fig. 4 – Average revenue growth depending on the level of ecosystem integration.**

Диаграмма (рис.5) отражает ожидаемые эффекты от трансформации в ближайшие два года на основе стратегических планов 50 российских компаний, внедряющих GenAI, 5G и цифровые двойники. Прогнозируется рост производительности труда на 28–37%, рентабельности — на 16–24%, снижение транзакционных издержек — на 32–42%.



**Рис. 5 – Ожидаемые эффекты от цифровой трансформации**

**Fig. 5 – Expected effects of digital transformation**

Особенно важно, что максимальный эффект ожидается у компаний с высоким уровнем экосистемной интеграции, где GenAI будет применяться не только внутри организации, но и для совместного прогнозирования спроса, управления цепочками поставок и персонализации клиентского опыта в реальном времени. Однако, как отмечено в ограничениях исследования, эти данные требуют последующей эмпирической верификации.

Экосистемная интеграция является мультипликатором цифровой трансформации. Компании с высоким уровнем интеграции ( $\geq 3$  внешних API/партнёрства) демонстрируют в среднем на 26% большую рентабельность. Полученные результаты согласуются с международными исследованиями, представленными в табл. 6.

**Таблица 6. Результаты сравнительного анализа**

**Table 6. Results of comparative analysis**

| Показатель Indicator              | Средний эффект Average effect   |
|-----------------------------------|---|
| McKinsey (2024)                   | +10–15% прирост производительности/ productivity gains  |
| Gartner (2023)                    | 70 % проектов не достигают целей/ projects do not achieve their goals                             |
| OECD (2023)                       | рост TFP на 7–11 %/ TFP growth by 7–11%/  |
| Настоящее исследование This study | +18–27% производительность, +12–19% рентабельность<br>+18–27% productivity, +12–19% profitability |

Таким образом, эффект цифровой трансформации в России превышает средние мировые значения при условии инженерной зрелости ИТ-инфраструктуры и наличия компетентных DevOps/ML-специалистов.

**Вывод.** Впервые для России проведена количественная оценка влияния инженерных решений (платформы, ML-модели, цифровые двойники) на финансовые показатели.

Эмпирически подтверждён эффект насыщения при высокой цифровой зрелости ( $DC > 0.7$ ).

Разработана интегральная модель цифровой трансформации, объединяющая платформенный, компетентностный и экосистемный подходы.

Обоснованы методические принципы измерения цифровых компетенций, пригодные для статистического анализа.

Анализ охватывал 250 крупных и средних компаний России. Малый бизнес и стартапы не включены, что ограничивает внешнюю валидность. Возможна обратная причинно-следственная связь: более успешные компании инвестируют в цифровизацию активнее.

Для минимизации смещения использованы инструментальные переменные с временными лагами. Преобладание ИТ-, финансового и промышленного секторов может влиять на структуру эффектов. В выборку не вошли предприятия, прекратившие деятельность до 2023 года. Показатели 2024–2025 гг. получены из стратегических планов и требуют последующей верификации.

Цифровая трансформация представляет собой инженерно-организационный процесс, который охватывает архитектуру информационных систем, подготовку кадров и интеграцию в экосистему партнёров. Эмпирический анализ показал: производительность труда увеличивается на 18–27%, рентабельность - на 12–19%, транзакционные издержки снижаются на 22–35%. Прогнозные сценарии (2024–2025 гг.) при активном внедрении GenAI, 5G и цифровых двойников демонстрируют потенциал прироста производительности до 28–37%. Полученные результаты подтверждают необходимость комплексного подхода к цифровой трансформации, объединяющего платформенные решения, компетенции персонала и экосистемную интеграцию. Результаты проведенного исследования позволяют сформулировать практические рекомендации:

Для бизнеса и предпринимательской среды:

1. Переходить от монолитных систем к платформенной архитектуре (Kubernetes, API-first, микросервисы).
2. Ежегодно направлять 15–20% ИТ-бюджета на повышение квалификации сотрудников (DevOps, ML, облачные технологии).
3. Активно участвовать в экосистемных партнёрствах (не менее 3 внешних интеграций).
4. Начинать цифровую трансформацию на ранних этапах развития — максимальная отдача достигается при  $DC \in [0.2; 0.6]$ .

Для органов власти:

1. Развивать цифровую инфраструктуру (5G, ЦОДы, широкополосный доступ).
2. Поддерживать инженерные и ИТ-кадры через гранты, налоговые льготы и программы повышения квалификации.
3. Стимулировать экосистемное сотрудничество: развитие B2B-площадок, технопарков, центров компетенций.

Перспектива дальнейших исследований состоит в расширении выборки на малые и средние предприятия; в проведении анализа влияния искусственного интеллекта (GenAI) на производственные и управленческие процессы; в разработке оценочной шкалы цифровой зрелости (Digital Maturity Index) для отраслевого сравнения.

#### **Библиографический список:**

1. Указ Президента РФ от 09.05.2017 № 203 «О Стратегии развития информационного общества в Российской Федерации на 2017–2030 годы».
2. Катяло В.С., Медведев Д.А. Платформы и экосистемы в современной теории фирмы // *Вестник Санкт-Петербургского университета. Менеджмент.* — 2020. — № 3. — С. 342–363.
3. Моисеев С.Р. Цифровая трансформация банков: теория и практика // *Деньги и кредит.* 2021. № 2. С. 35–45.

4. Шувалов М.В. Экосистемы в цифровой экономике: формирование и развитие // *Вопросы экономики*. — 2022. — № 5. — С. 120–136.
5. Autio E., Nambisan S. Digital Entrepreneurship and Ecosystems // *Entrepreneurship Theory and Practice*. — 2023. — Vol. 47, № 1. — DOI: 10.1177/10422587221104185.
6. Brandenburger A., Nalebuff B. *Co-opetition*. — New York: Currency Doubleday, 2018.
7. Bloom N., Sadun R., Van Reenen J. Management Practices and Digital Transformation // *The Quarterly Journal of Economics*. — 2022. — Vol. 137, № 3. — DOI: 10.1093/qje/qjac012.
8. Christensen C.M., Raynor M.E., McDonald R. What is Disruptive Innovation? // *Harvard Business Review*. — 2020. — Vol. 98, № 12. — P. 102–111.
9. Федеральная служба государственной статистики (Росстат). Официальный сайт. URL: <https://rosstat.gov.ru> (дата обращения: 10. 08.2025).
10. Gartner Research. *Digital Transformation: A Roadmap for Billion-Dollar Success*. Stamford, CT: Gartner Inc., 2022.
11. Hein A., Schreieck M., Riasanow T. et al. Digital Platform Ecosystems // *Electronic Markets*. — 2020. — Vol. 30. — P. 87–98. — DOI: 10.1007/s12525-019-00380-9.
12. Институт статистических исследований и экономики знаний НИУ ВШЭ. *Мониторинг цифровой экономики России*. — Москва: НИУ ВШЭ, 2023.
13. Jacobides M. G., Cennamo C., Gawer A. Towards a Theory of Ecosystems // *Strategic Management Journal*. — 2018. — Vol. 39, № 8. — P. 2255–2276. — DOI: 10.1002/smj.2904.
14. Kenney M., Zysman J. The Rise of the Platform Economy // *Issues in Science and Technology*. — 2019. — Vol. 32, № 3. — P. 61–69.
15. НИУ ВШЭ. *Цифровая экономика и общество*. — Москва, 2023.
16. Росстат. *Статистический ежегодник России*. — Москва, 2023. URL: [https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/yearbook\\_2023.pdf](https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/yearbook_2023.pdf).
17. Schwab K. *The Fourth Industrial Revolution*. — New York: Crown Publishing, 2018.
18. Teece D.J. Dynamic Capabilities: A Guide for Managers // *California Management Review*. — 2018. — Vol. 60, № 4. — P. 153–174.
19. *Индикаторы цифровой экономики: 2024*. Статистический сборник / НИУ ВШЭ, Росстат, Минцифры России. — Москва, 2024.
20. *Цифровая трансформация отраслей: стартовые условия и приоритеты*. НИУ ВШЭ, Москва, 2024.
21. *Impact of Digitalization on Corporate Financial Profitability: The Case of Russia*. — ResearchGate, 2024. — DOI: 10.1016/j.jbusres.2024.105843.
22. *An Ecological Perspective to Master the Complexities of the Digital Ecosystem*. — *Nature Communications*. — 2024. — Vol. 15, Article № 2405. — DOI: 10.1038/s44260-024-00036-0.
23. *Geography of Artificial Intelligence Technologies in Russia*. — Springer, 2024. — DOI: 10.1134/S2079970524600525.
24. OECD. *Measuring the Digital Transformation: A Roadmap for the Future*. — Paris: OECD Publishing, 2023. — DOI: 10.1787/9789264311992-en.
25. PwC. *Digital Transformation Outlook 2024–2025: Lessons from Failed Projects*. — London, 2024.
26. McKinsey Global Institute. *The State of Digital Transformation 2024: What Worked, What Didn't*. — New York, 2024.
27. World Bank. *Digital Economy Diagnostics for Eastern Europe and Central Asia*. — Washington, DC: World Bank Group, 2023.
28. Gartner. *Why 70% of Digital Transformation Projects Fail*. — Research Report, 2023.
29. Счётная палата РФ. *Анализ эффективности внедрения цифровых решений в государственном секторе*. — Москва, 2024.
30. Волков С.А., Кузнецов А.В. Проблемы реализации цифровых инициатив в промышленности РФ // *Вестник экономических исследований*. — 2023. — № 4. — С. 45–57.

#### References:

1. Decree of the President of the Russian Federation of May 9, 2017, No. 203, "On the Strategy for the Development of the Information Society in the Russian Federation for 2017–2030." (In Russ)
2. Katkalo, V.S., Medvedev, D.A., "Platforms and Ecosystems in the Modern Theory of the Firm." *Bulletin of St. Petersburg University. Management*, 2020;3:342–363. (In Russ)
3. Moiseev, S.R., "Digital Transformation of Banks: Theory and Practice." *Money and Credit*, 2021; 2:35–45. (In Russ)
4. Shuvalov, M.V., "Ecosystems in the Digital Economy: Formation and Development." *Voprosy Ekonomiki*. 2022; 5:120–136. (In Russ)
5. Autio E., Nambisan S. Digital Entrepreneurship and Ecosystems. *Entrepreneurship Theory and Practice*. 2023; 47(1) DOI: 10.1177/10422587221104185.
6. Brandenburger A., Nalebuff B. *Co-opetition*. New York: Currency Doubleday, 2018.
7. Bloom N., Sadun R., Van Reenen J. Management Practices and Digital Transformation. *The Quarterly Journal of Economics*. 2022; 137:3 DOI: 10.1093/qje/qjac012.

8. Christensen C.M., Raynor M.E., McDonald R. What is Disruptive Innovation?. *Harvard Business Review*. 2020; 98(12):102–111.
9. Federal State Statistics Service (Rosstat). Official website. URL: <https://rosstat.gov.ru> (accessed: 10.10.2025). (In Russ)
10. Gartner Research. Digital Transformation: A Roadmap for Billion-Dollar Success. Stamford, CT: Gartner Inc., 2022.
11. Hein A., Schrieck M., Riasanow T. et al. Digital Platform Ecosystems. *Electronic Markets*. 2020;30:87–98. DOI: 10.1007/s12525-019-00380-9.
12. Institute for Statistical Studies and Economics of Knowledge, National Research University Higher School of Economics. Monitoring the Digital Economy of Russia. Moscow: National Research University Higher School of Economics, 2023. (In Russ)
13. Jacobides, M. G., Cennamo, C., Gawer, A. “Towards a Theory of Ecosystems”. *Strategic Management Journal*. 2018; 39( 8): 2255–2276. DOI: 10.1002/smj.2904.
14. Kenney, M., Zysman, J. “The Rise of the Platform Economy”. *Issues in Science and Technology*. 2019; 32: (3):61–69.
15. National Research University Higher School of Economics. Digital Economy and Society. Moscow, 2023. (In Russ)
16. [https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/yearbook\\_2023.pdf](https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/yearbook_2023.pdf). Rosstat. Statistical Yearbook of Russia. Moscow, 2023. (In Russ)
17. Schwab K. The Fourth Industrial Revolution. New York: Crown Publishing, 2018.
18. Teece D. J. Dynamic Capabilities: A Guide for Managers. *California Management Review*. 2018; 60(4): 153–174.
19. Digital Economy Indicators: 2024. Statistical Digest / HSE, Rosstat, Ministry of Digital Development, Communications and Mass Media of the Russian Federation. Moscow, 2024. (In Russ)
20. Digital Transformation of Industries: Starting Conditions and Priorities. — National Research University Higher School of Economics, Moscow, 2024. (In Russ)
21. Impact of Digitalization on Corporate Financial Profitability: The Case of Russia. - ResearchGate, 2024. - DOI: 10.1016/j.jbusres.2024.105843.
22. An Ecological Perspective to Master the Complexities of the Digital Ecosystem. *Nature Communications*. 2024;15, Article No. 2405. - DOI: 10.1038/s44260-024-00036-0.
23. Geography of Artificial Intelligence Technologies in Russia. Springer DOI: 10.1134/S2079970524600525.
24. OECD. Measuring the Digital Transformation: A Roadmap for the Future. Paris: OECD Publishing, 2023. DOI: 10.1787/9789264311992-en.
25. PwC. Digital Transformation Outlook 2024–2025: Lessons from Failed Projects. London, 2024.
26. McKinsey Global Institute. The State of Digital Transformation 2024: What Worked, What Didn't. New York, 2024.
27. World Bank. Digital Economy Diagnostics for Eastern Europe and Central Asia. Washington, DC: World Bank Group, 2023.
28. Gartner. Why 70% of Digital Transformation Projects Fail. Research Report, 2023.
29. Accounts Chamber of the Russian Federation. Analysis of the Effectiveness of Implementing Digital Solutions in the Public Sector. Moscow, 2024. (In Russ)
30. Volkov S. A., Kuznetsov A. V. Problems of implementing digital initiatives in the industry of the Russian Federation. *Bulletin of Economic Research*. 2023; 4:45–57. (In Russ)

#### Сведения об авторах:

Сабина Эминовна Савзиханова, доктор экономических наук, профессор кафедры информационных технологий и информационной безопасности; [sse1122@yandex.ru](mailto:sse1122@yandex.ru); ORCID 0000-000324928-1715

Тамила Ислахидиновна Исабекова, кандидат физико-математических наук, доцент, зав. кафедрой прикладной математики и информатики; [mila775@mail.ru](mailto:mila775@mail.ru) ORCID 0000-0002-2970-594X

Нигара Эминовна Эминова, кандидат экономических наук, доцент кафедры информационных технологий и информационной безопасности; [nigara79@yandex.ru](mailto:nigara79@yandex.ru); ORCID 0000-0002-0813-0809

#### Information about authors:

Sabina E. Savzikhanova, Dr. Sci. (Econom.), Prof., Department of Information Technologies and Information Security; [sse1122@yandex.ru](mailto:sse1122@yandex.ru)

Tamila I. Isabekova, Cand. Sci. (Physic. and Mathemat.), Assoc. Prof., Head of the Department of Applied Mathematics and Informatics; [mila775@mail.ru](mailto:mila775@mail.ru) ORCID 0000-0002-2970-594X

Nigara E. Eminova, Cand. Sci. (Econom.), Assoc. Prof., Department of Information Technology and Information Security; [nigara79@yandex.ru](mailto:nigara79@yandex.ru); ORCID 0000-0002-0813-0809

#### Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 12.08.2025.

Одобрена после рецензирования/Revised 29.09.2025.

Принята в печать/Accepted for publication 04.11.2025.

## **Разработка информационной системы поддержки и планирования предпроектных работ по газификации**

**В.В. Соболева, П.Н. Садчиков**

Астраханский государственный архитектурно-строительный университет,  
414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 18, Россия

**Резюме. Цель.** Целью исследования является разработка информационной системы поддержки и планирования предпроектных работ по газификации объекта. **Метод.** Для выявления зависимостей между элементами бизнес-процессов газификации объекта составлена теоретико-множественная модель. Выявлены критерии, влияющие на подбор оборудования, разработан алгоритм автоматизации процесса подбора оборудования, необходимого для газификации объекта. **Результат.** Представлено решение задач разработки моделей, алгоритмов и информационной системы поддержки и планирования предпроектных работ по газификации. Построены теоретико-множественная модель и алгоритмы для автоматизации формирования проектной документации. **Вывод.** Информационная система позволяет вводить данные по газифицируемым объектам, регистрировать заявки на газификацию, подбирать оборудование и проводить гидравлические расчеты, формировать договоры с пояснительной запиской и отчеты.

**Ключевые слова:** информационная система, газификация, планирование и мониторинг работ, автоматизация процессов, теоретико-множественная модель, база данных, весовой показатель, экономическая эффективность, экологическая целесообразность

**Для цитирования:** В.В. Соболева, П.Н. Садчиков. Разработка информационной системы поддержки и планирования предпроектных работ по газификации. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025;52(4):147-153. DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-4-147-153

## **Development of an information system to support and plan pre-project work on gasification**

V.V. Soboleva, P.N. Sadchikov

Astrakhan State University of Architecture and Civil Engineering,  
18 Tatishcheva St., Astrakhan, 414056, Russia

**Abstract. Objective.** The purpose of the study is to develop an information system for supporting and planning pre-project work on gasification of the facility. **Method.** A set-theoretic model was developed. Criteria influencing equipment selection were identified, and an algorithm was developed to automate the process of selecting equipment for gasification of a facility. **Result.** The article presents the results of a study aimed at solving the problems of developing models, algorithms and an information system for supporting and planning pre-project gasification work. A set-theoretic model and algorithms were built to automate the formation of project documentation. **Conclusion.** The information system allows you to enter data on gasified facilities, register applications for gasification, select equipment and carry out hydraulic calculations, form contracts with an explanatory note and reports.

**Keywords:** information system, gasification, planning, work monitoring, process automation, set-theoretical model, database, weighting indicator, efficiency, environmental feasibility

**For citation:** V.V. Soboleva, P.N. Sadchikov. Development of an information system to support and plan pre-project work on gasification. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2025;52(4):147-153. DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-4-147-153

**Введение.** В последние годы в области планирования работ по газификации наблюдается ряд новых тенденций. Во-первых, все большее внимание уделяется вопросам устойчивого развития. При планировании газификации необходимо учитывать ее влияние на окружающую среду и социальные аспекты [1-3]. Во-вторых, широко используются современные информационные технологии. Они позволяют автоматизировать процесс планирования и повысить его эффективность [4-10].

В настоящее время в России проводится масштабная программа газификации. В рамках этой программы планируется газифицировать более 50 миллионов домовладений и предприятий [11], [12]. Планирование работ по газификации в рамках этой программы является сложной и многогранной задачей. Она требует использования современных методов и технологий, а также учета всех аспектов устойчивого развития.

В области планирования работ по газификации выделены основные направления исследований:

1. Разработка системных методов планирования газификации, позволяющих учитывать ее влияние на экономику, окружающую среду и социальные аспекты [13], [14];
2. Оценка экономической эффективности и экологической целесообразности реализации проектов по газификации [15], [16];
3. Сокращение сроков подготовки проектной документации и дальнейшей реализации посредством использования методов и средств автоматизации работ [17], [18].

**Постановка задачи.** Применение информационных систем (ИС) для планирования работ по газификации имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционными методами планирования. Во-первых, ИС позволяют учитывать более широкий круг факторов, влияющих на процесс газификации. Например, они могут учитывать данные о спросе на природный газ, о наличии ресурсов, о технических характеристиках оборудования, о финансовых ограничениях и т. д. [19] Во-вторых, ИС могут обеспечить более эффективное решение сложных задач, таких как оптимизация маршрутов газопровода или выбор оптимального варианта газификации конкретного объекта. В-третьих, могут сократить время и трудозатраты на планирование работ по газификации [20].

В настоящее время в мире существует ряд примеров применения информационных систем для планирования работ по газификации. Например, в Китае компания Sinopac использует их для оптимизации маршрутов газопровода. В России компания «Газпром» использует ИС для планирования газификации регионов; компания «Газпром Нефтехим Салават» для выбора оптимальной конфигурации оборудования газопроводов, «Газпром трансгаз Санкт-Петербург» для планирования и составления графиков ремонта газопроводов и сокращения времени простоев.

С развитием технологий и появлением новых методов искусственного интеллекта, таких как нечеткое принятие решений, генетические алгоритмы и оптимизация роя частиц, появляется возможность создания более интеллектуальных систем.

Конкретный алгоритм планирования проектных работ по газификации может варьироваться в зависимости от размера и сложности проекта, а также требований и регулиций конкретного региона. Однако, для каждого из них характерно: определение целей в рамках данного проекта по газификации; определение объема работ, необходимых для газификации (расчет падения давления в газовой трубе, подбор оборудования в зависимости от требований и расхода газа и т. д.); оценка затрат, необходимых для выполнения проекта (материалы, оборудование, трудовые ресурсы и др.); установление последовательности выполнения работ; составление календарного графика реализации отдельных этапов выполнения работ; определение конечных сроков для каждого этапа и всего проекта в целом.

**Методы исследования.** Для лучшего понимания процессов планирования газификации и выявления зависимостей между их элементами рассмотрены бизнес-процессы, были формализованы в виде теоретико-множественной модели.

Процесс планирования газификации можно представить в виде следующей совокупности множеств (1):

$$GZ = \{Z, M, R, P, D\}, \quad (1)$$

где  $Z$  – множество заявок на газификацию объектов;  
 $M$  – множество мероприятий, проводимых для разработки проекта газификации;  
 $R$  – множество ресурсов, используемых для газификации;  
 $P$  – множество организаций, осуществляющих согласование заявки;  
 $D$  – множество документов, подготавливаемых по итогам проводимых проектных работ.  
 Рассмотрим каждое множество более подробно.

Основанием для выполнения проектных работ являются обращения клиентов  $z_i \in Z$ .

В заявке  $z_i$  указываются следующие данные (2):

$$z_i = \{o_i, A_i, k_i, w_i\}, \quad (2)$$

где  $o_i$  – газифицируемый объект;  
 $A_i$  – газовое оборудование объекта газификации;  
 $k_i$  – клиент, для которого требуется разработать проект газификации;  
 $w_i$  – требуемые работы, указанные в заявке.

Для объекта, по формуле 3, учитываются следующие параметры, которые влияют на последующие проектные работы:

$$o_i = \{n, l, c\}, \quad (3)$$

где  $n$  – наименование объекта;  $l$  – месторасположение объекта;  
 $c$  – дополнительные характеристики объекта, которые необходимо учитывать в проекте газификации.

Согласующие организации входят в зависимость от совокупности требуемых работ и определяются формулой 4:

$$w \rightarrow P. \quad (4)$$

В соответствии с моделью бизнес-процессов мероприятия  $M$  можно представить в виде объединения четырех подмножеств, соответствующих основным этапам планирования работ (5):

$$M = M_1 \cup M_2 \cup M_3 \cup M_4, \quad (5)$$

где  $M_1$  – множество мероприятий, связанных с приемом заявок на газификацию и проверку принятых документов;

$M_2$  – множество мероприятий по подготовительным работам, связанным с заключением договора с клиентом, изучением нормативов, сбором информации по объекту и доступным ресурсам и т.д.;

$M_3$  – множество основных мероприятий, связанных с проектными работами (проведение расчетов, составление проектной документации, согласование смет и т.д.);

$M_4$  – множество мероприятий для сдачи проектных работ заказчику.

Для каждого мероприятия  $m \in M$  привлекаются ресурсы  $R = \{r\}$ , включающие три основные составляющие и определяемые по формуле 6:

$$R = T \cup B \cup U, \quad (6)$$

где  $T$  – множество сотрудников, осуществляющих работу по управлению инцидентами;

$B$  – финансовые ресурсы, затрачиваемые на решение инцидента;

$U$  – множество материальных ресурсов, использованных для проведения ремонтных работ.

В результате проектных работ составляются документы  $D$ , включающие (7):

$$D = C \cup I \cup E \cup L, \quad (7)$$

где  $C$  – множество договоров между заказчиками и проектным центром;

$I$  – проект газификации (документация и чертежи, состав которых зависит от характеристик проектируемого газопровода);

$E$  – множество актов выполненных работ;

$L$  – сметы по проектным работам.

Параметры проектной документации  $I$  рассчитываются по специальным формулам  $F$  и зависят от таких характеристик газифицируемых узлов, как диаметр  $d$ , длина  $l$  и расход газа  $s$  (8):

$$I = F(d, l, s). \quad (8)$$

Смета определяется ресурсами, привлекаемыми для составления проекта (9):

$$R \rightarrow L. \quad (9)$$

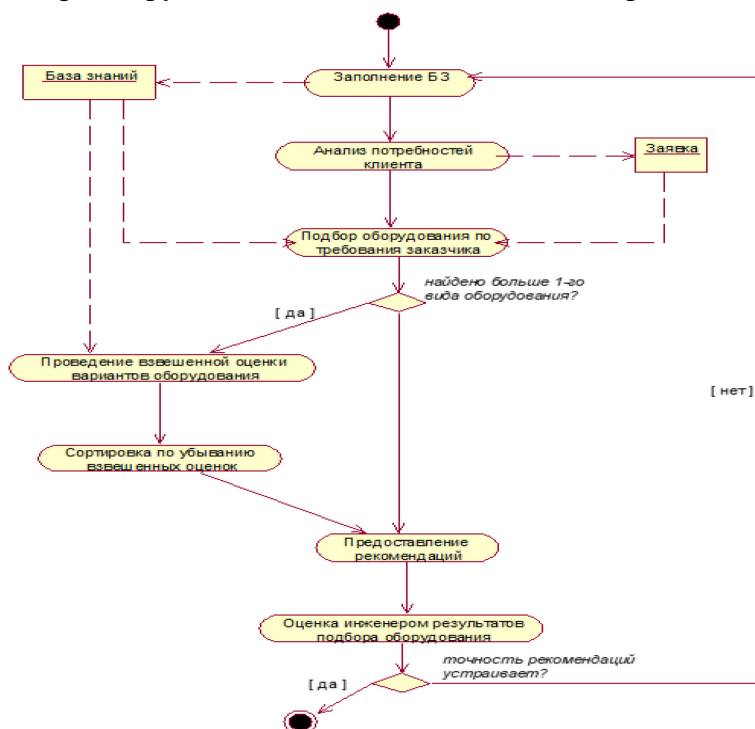
Ресурсы в свою очередь характеризуются их наименованием  $nr$ , типом  $tr$  и ценой  $pr$  (10):

$$R = \{nr, tr, pr\}. \quad (10)$$

В результате проведенного исследования были выявлены наиболее существенные критерии, влияющие на подбор оборудования:

- размер и тип объекта (для квартир может быть рекомендовано использование газовых котлов или комбинированных котлов для отопления и горячего водоснабжения, для домовладений могут потребоваться более мощные системы отопления и бойлеры);
- потребности в энергии (система должна рекомендовать оборудование, которое может обеспечить необходимую энергию для удовлетворения потребностей в отоплении, водоснабжении и пищеприготовлении);
- цена оборудования (система должна предлагать варианты, соответствующие финансовым возможностям клиента, и давать рекомендации о различных ценовых категориях оборудования).

**Обсуждение результатов. Разработка информационной системы поддержки и планирования предпроектных работ по газификации.** В соответствии с проведенным анализом и выделенными критериями был разработан алгоритм, позволяющий автоматизировать процесс подбора оборудования, необходимого для газификации объекта (рис. 1).



**Рис. 1 – Алгоритм подбора оборудования**  
**Fig. 1 – Equipment selection algorithm**

Его реализация дает возможность оценить варианты представленного в справочниках оборудования, основываясь на результатах выполнения рассмотренных критериев, а также заполнить базу знаний доступных технических решений при учете предпочтений и бюджета заказчика. Кроме того, алгоритм учитывает ограничения по техническим требованиям и нормативами и предоставляет только варианты оборудования, которые будут соответствовать требуемым нормам безопасности. Если под критерии подходит несколько видов оборудования для отфильтрованного списка рассчитываются их взвешенные оценки по релевантности запросам клиента и технологическим условиям с учетом приоритета. Алгоритм расчета весов критериев приведен на рис. 2.

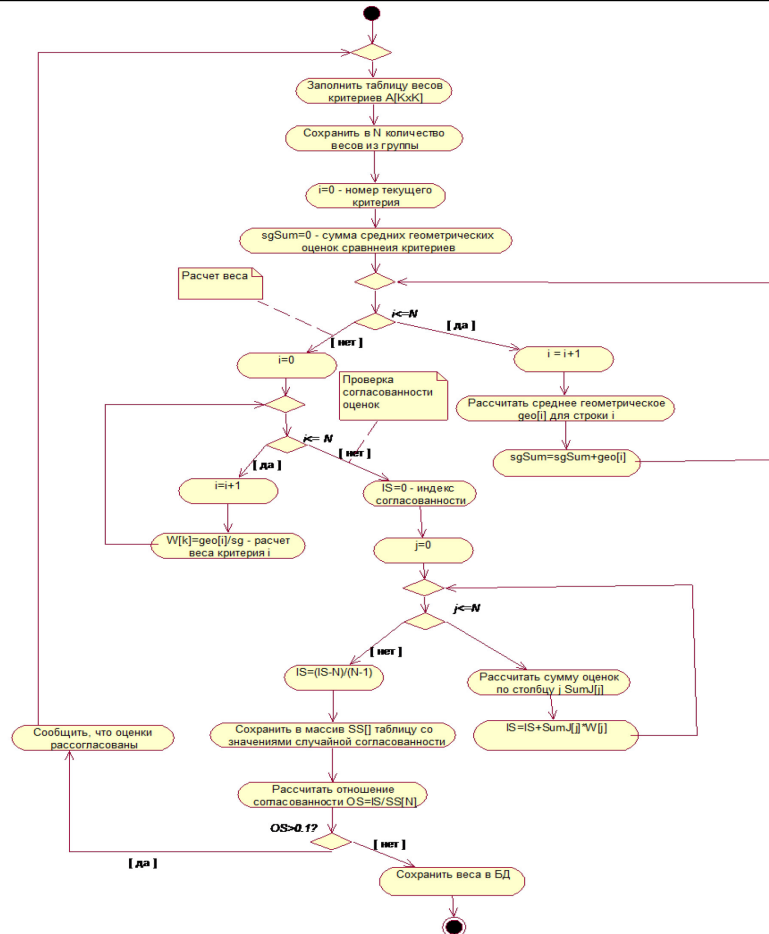


Рис. 2 – Алгоритм расчета весов критериев  
 Fig. 2 – Algorithm for calculating criteria weights

Для взвешенной оценки рекомендуемого оборудования и выбора альтернатив используются методы принятия решения на основе решения задачи максимизации, согласно которой для каждого вида оборудования вычисляется функция полезности  $F_i$  (11):

$$F_i = \sum_{j=1}^k u_{ij} \cdot W_j, \quad (11)$$

где  $u_{ij}$  – нормированное значение критерия  $j$  для альтернативного оборудования  $i$ ;  $W_j$  – вес критерия  $j$ .

В результате выбирается то оборудование, для которого функция полезности максимальная. Для нормализованной оценки альтернативного оборудования по критерию используются формулы (12) и (13).

$$u_{ij} = \frac{U_{ij} - U_j^{\min}}{U_j^{\max} - U_j^{\min}} \quad (12)$$

$$u_{ij} = \frac{U_j^{\max} - U_{ij}}{U_j^{\max} - U_j^{\min}} \quad (13)$$

где  $U_{ij}$  – значение критерия  $j$  для альтернативного оборудования  $i$ ;

$U_j^{\min}$  – минимальное значение критерия  $j$  среди всех видов оборудования;

$U_j^{\max}$  – максимальное значение критерия  $j$  среди всех видов оборудования.

Веса критериев устанавливаются для каждого заказа индивидуально. Веса рассчитываются автоматически и могут принимать значения от 0 до 1. При этом эксперт может изменить веса методом парных сравнений. Роль эксперта выполняет инженер-проектировщик.

**Вывод.** В ходе проведения исследования была разработана информационная система поддержки и планирования предпроектных работ по газификации. Данная система позволяет автоматизировать процесс предпроектных расчетов путем разработки алгоритма

планирования работ по газификации, учитывающего специфику этапов, зависящих от вида объекта и требований заказчика, с помощью метода взвешенных оценок альтернативных решений. Реализация разработанной информационной системы по подбору оборудования позволит:

- упростить и ускорить процесс необходимых расчетов для проектных работ,
- оптимизировать этап анализа и оценки,
- снизить вероятность ошибок неправильного выбора,
- повысить качество предоставляемых услуг.

Благодаря программному средству значительно сократятся время и усилия, затрачиваемые сотрудниками компании на подбор оборудования для каждого объекта газификации. В перспективе разработанная программа может быть интегрирована с другими программными системами организаций по планированию работ по газификации.

#### **Библиографический список:**

1. Богомолов А.А., Баратинский Ю.В. Методики планирования и управления проектами газификации // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2014. - № 1(87). - С. 94-98.
2. Конев В.И., Пастухов Д.А. Использование сетевого планирования при реализации проекта газификации территорий // Молодежь и наука в XXI веке: сборник трудов международной научной конференции. - 2017. - Том 4. - С. 265-269.
3. Крылова О.И., Кириченко В.П. Моделирование процесса планирования и управления проектами газификации // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. - 2018. - Том 61. - № 9. - С. 718-725.
4. Дуда Ю.В., Бровка Д.Д., Голомазов Ю.В. Оптимизация планирования и управление ресурсами сложных проектных работ газификации // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). - 2013. - № 1. - С. 65-76.
5. Приходько В.В., Широков В.Н. Система поддержки и планирования проектных работ по газификации с использованием алгоритмов генетического поиска // Вестник Чувашского университета. Серия: Технические науки. - 2007. - № 1(43). - С. 90-96.
6. Литвинов В.В., Литвинова И.В. Автоматизация и планирование работ на объектах газификации. - М.: Издательский центр «Академия», 2008. – 320с.
7. Гусева О.В., Гусев В.В. Планирование крупных проектов газификации с использованием пакета MS Project // Материалы XXVIII Международной конференции «Научное развитие: региональный и международный опыт». - 2019. - С. 203-206.
8. Мухин А.А. Компьютерная система планирования и управления работами по газификации территорий // Проблемы экологии и устойчивого развития. - 2015. - № 3(43). - С. 14-18.
9. Туровский А.Г. Алгоритмы оптимизации и планирования проектных работ по газификации // Сибирский научный вестник. - 2014. - № 6(105). - С. 166-171.
10. Шмат В.Н., Мироненко Д.В. Автоматизация управления процессом газификации при использовании системы планирования и контроля работ // Газовая промышленность. - 2012. - № 11. - С. 65-69.
11. АО «Газпром газораспределение Ленинградская область»: [официальный сайт]. – URL: <https://www.gazprommap.ru/lenobl/>
12. Официальный сайт программы газификации России [Электронный ресурс]. URL: <https://www.gazprommap.ru/>
13. Нефёдов Л.И., Шевченко М.В. Прикладная информационная технология организации, планирования и синтеза мониторинга регионального газоснабжения // Информационные технологии. 2016. № 5. С. 45-52.
14. Сурнин А.Ф. Муниципальные информационные системы: опыт разработки и эксплуатации. - Обнинск: ИАТЭ, 1998. - 214 с.
15. Ефремов Э.И., Ефремов А.Э. Методологические и методические основы оценки эффективности газификации населённых пунктов // Газовая промышленность. - 2015. - № 12. - С. 56-61.
16. Наумова Н.С. Моделирование и оптимизация процесса газификации // Вестник МГСУ. - 2018. - Т. 13, № 5. - С. 112-120.
17. Белоглазова Т.Н., Романова Т.Н. Эффективное внедрение цифровых технологий в сфере газоснабжения // Цифровая трансформация. - 2022. - № 3(15). - С. 45-53.
18. Мальков А.В., Баландин Д.В., Большакова М.Н., Знаменский А.В. Автоматизированная система управления распределением газа ОАО "Уральские газовые сети" // Автоматизация в промышленности. - 2009. - № 7. - С. 34-39.
19. Постановление Правительства Российской Федерации от 27 июля 2010 г. № 557 "О порядке планирования, разработки и реализации программ газификации субъектов Российской Федерации" // Собрание законодательства РФ. - 2010. - № 31. - Ст. 4252.

20. Спектор Н.С. Области эффективной реализации проектов газификации // Энергетическая политика. - 2017. - № 4(122). - С. 78-85.

#### References:

1. Bogomolov A.A., Baratinsky Yu.V. Methods of planning and management of gasification projects. *Scientific and technical bulletin of information technologies, mechanics and optics*. 2014;1(87): 94-98. (In Russ)
2. Konev V.I., Pastukhov D.A. The use of network planning in the implementation of the project of gasification of territories // Youth and science in the XXI century: a collection of works of an international scientific conference. 2017;4:265-269. (In Russ)
3. Krylova O.I., Kirichenko V.P. Modeling the process of planning and managing gasification projects. *News of higher educational institutions. Instrument making*. 2018;61(9):718-725. (In Russ)
4. Duda Yu.V., Brovkina D.D., Golomazov Yu.V. Optimization of planning and resource management of complex gasification design works. *Bulletin of the Moscow Automobile and Road State Technical University (MADI)*. 2013;1: 65-76. (In Russ)
5. Prikhodko V.V., Shirokov V.N. System of support and planning of design work on gasification using genetic search algorithms. *Bulletin of Chuvash University. Series: Technical Sciences*. 2007;1(43): 90-96. (In Russ)
6. Litvinov V.V., Litvinova I.V. Automation and planning of work at gasification facilities. - M.: Academy Publishing Center, 2008. - 320. (In Russ)
7. Guseva O.V., Gusev V.V. Planning of major gasification projects using the MS Project package // Materials of the XXVIII International Conference "Scientific Development: Regional and International Experience." – 2019; 203-206. (In Russ)
8. Mukhin A.A. Computer system for planning and management of work on gasification of territories. *Problems of ecology and sustainable development*. 2015;3(43):14-18. (In Russ)
9. Turovsky A.G. Algorithms for optimization and planning of design work on gasification. *Siberian Scientific Bulletin*. 2014;6(105): 166-171. (In Russ)
10. Shmat V.N., Mironenko D.V. Automation of the gasification process control using the work planning and control system. *Gas industry*. 2012;11:65-69. (In Russ)
11. Gazprom Gas Distribution Leningrad Region JSC: [official website]. – URL: <https://www.gazprom-map.ru/lenobl/> (In Russ)
12. The official website of the Russian gasification program [Electronic resource]. URL: <https://www.gazprom-map.ru/> (In Russ)
13. Nefyodov L.I., Shevchenko M.V. Applied information technology of organization, planning and synthesis of monitoring of regional gas supply. *Information technologies*. 2016;5: 45-52. (In Russ)
14. Surnin A.F. Municipal information systems: development and operation experience. Obninsk:IATE, 1998:214
15. Efremov E.I., Efremov A.E. Methodological and methodological foundations for assessing the effectiveness of gasification of settlements. *Gas industry*. 2015;12.:56-61. (In Russ)
16. Naumova N.S. Modeling and optimization of the gasification process. *Bulletin of MGSU*. 2018;13( 5):112-120.
17. Beloglazova T.N., Romanova T.N. Effective implementation of digital technologies in the field of gas supply. *Digital transformation*. 2022;3(15): 45-53. (In Russ)
18. Malkov A.V., Balandin D.V., Bolshakova M.N., Znamensky A.V. Automated gas distribution control system of OJSC Ural Gas Networks. *Automation in industry*. 2009;7: 34-39. (In Russ)
19. Decree of the Government of the Russian Federation of July 27, 2010 No. 557 "On the Procedure for Planning, Development and Implementation of Gasification Programs of the Constituent Entities of the Russian Federation". *Collection of Legislation of the Russian Federation*. 2010;31: 4252. (In Russ)
20. Spector N.S. Areas of effective implementation of gasification projects. *Energy policy*. 2017;4(122):78-85.

#### Сведения об авторах:

Соболева Вера Владимировна, кандидат педагогических наук, доцент кафедры систем автоматизированного проектирования и моделирования; [veravsoboleva@yandex.ru](mailto:veravsoboleva@yandex.ru)

Садчиков Павел Николаевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры систем автоматизированного проектирования и моделирования, [pn\\_sadchikov@mail.ru](mailto:pn_sadchikov@mail.ru)

#### Information about authors:

Vera V. Soboleva, Cand. Sci. (Pedagog.), Assoc. Prof., Department of Computeraided Design and Modeling Systems; [veravsoboleva@yandex.ru](mailto:veravsoboleva@yandex.ru)

Pavel N. Sadchikov, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Assoc.Prof., Department of Computeraided Design and Modeling Systems, [pn\\_sadchikov@mail.ru](mailto:pn_sadchikov@mail.ru)

#### Конфликт интересов / Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/ Received 30.07.2025.

Одобрена после рецензирования/Revised 01.09.2025.

Принята в печать /Accepted for publication 01.11.2025.

## Методы планирования эксперимента в задачах моделирования и управления на примере объектов топливно-энергетического комплекса

Л.Г. Тугашова, И.П. Ситдикова, Б.Н. Латипов

Альметьевский государственный технологический университет «Высшая школа нефти»,  
423462, г. Альметьевск, ул. Советская, 186а, Россия

**Резюме. Цель.** Проведение планирования эксперимента для случаев двух и трех факторов на примере объектов топливно-энергетического комплекса. **Методы.** Для повышения точности модели и учета нелинейности связи параметров применен ортогональный центральный композиционный план. **Результат.** Выполнены расчеты параметров плана, составлены матрицы планирования, получены уравнения регрессии. Реализован двухфакторный эксперимент, позволивший построить адекватные квадратичные регрессионные модели для прогнозирования расхода и давления в системе транспортировки жидкости. Проведен трехфакторный эксперимент на основе секционной модели первичной переработки нефти. Факторы, влияющие на критерий: расход перегретого водяного пара, флегмовое число, потенциальное содержание светлых фракций в сырье. Инструментами реализации выбраны программные пакеты MatLab и Python. Выполнена оценка адекватности полученных регрессионных квадратичных зависимостей исходным данным по критерию Фишера. **Вывод.** Решена задача максимизации расхода жидкости в системе транспортировки жидкости. Проведенное исследование введения воздуха в циркулирующую вязкую жидкость можно рассматривать как удобную модель для изучения двухфазных потоков. Применение статистической модели на установках ректификации нефти способствует повышению эффективности функционирования установок.

**Ключевые слова:** планирование эксперимента, статистическая модель, физическая модель, центральный композиционный план, нефть, расходомер, газовый фактор

**Для цитирования:** Л.Г. Тугашова, И.П. Ситдикова, Б.Н. Латипов. Методы планирования эксперимента в задачах моделирования и управления на примере объектов топливно-энергетического комплекса. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025;52(4):154-164. DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-4-154-164

## Methods of Experimental Design in Modeling and Control Tasks Illustrated by Fuel and Energy Complex Facilities

L.G. Tugashova, I.P. Sitdikova, B.N. Latipov

Almetyevsk State Technological University «Higher School of Petroleum»,  
423462, Almetyevsk, 186a Sovetskaya Street, Russia

**Abstract. Objective.** To carry out experimental design for two- and three-factor cases using facilities of the fuel and energy complex as examples. **Methods.** An orthogonal central composite design was applied to improve model accuracy and account for nonlinear relationships among parameters. **Results.** The design parameters were calculated, planning matrices were constructed, and regression equations were obtained. A two-factor experiment was implemented, yielding adequate quadratic regression models for predicting flow rate and pressure in a liquid-transport system. A three-factor experiment was conducted based on a sectional model of primary oil refining. The factors affecting the criterion were: superheated steam flow rate, reflux ratio, and potential content of light fractions in the feed. MatLab and Python software packages were used. The adequacy of the obtained quadratic regression relationships to the original data was evaluated by Fisher's F-test. **Conclusions.** The problem of maximizing liquid flow in the transport system was

solved. The study of air injection into a circulating viscous liquid can serve as a convenient model for two-phase flow investigation. The application of the statistical model to oil rectification units contributes to improved operational efficiency of the installations.

**Keywords:** experimental design, statistical model, physical model, central composite design, oil, flow meter, gas factor

**For citation:** L.G. Tugashova, I.P. Sitdikova, B.N. Latipov. Methods of Experimental Design in Modeling and Control Tasks Illustrated by Fuel and Energy Complex Facilities. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2025;52(4):154-164. DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-4-154-164

**Введение.** Важной задачей при моделировании и управлении объектами топливно-энергетического комплекса (ТЭК) является изучение и идентификация состава и физико-химических свойств углеводородного сырья. Из-за присутствия в сырье технологических установок асфальто-смолистых веществ, парафинов, воды, солей на поверхностях стенок аппаратов могут возникать отложения. Получить знания о составе и физико-химических свойствах углеводородного сырья можно разными способами: справочная информация, лабораторные данные, экспериментально-статистические методы, планирование эксперимента.

В справочнике [1] приведены физико-химические свойства нефтей различных месторождений. В работе [2] предложены следующие аппроксимирующие зависимости кривой истинных точек кипения (ИТК) для нефти разных месторождений: кубическая парабола, степенная функция, арктангенс, показательно-степенная функция, кубическая парабола–арктангенс. Показано, что наилучшие результаты получены для комбинированной модели «кубическая парабола–арктангенс».

Оперативная оценка показателей качества нефтепродуктов необходима для выполнения современных требований стандартов. Наряду с поточными анализаторами и лабораторным анализом применяются виртуальные анализаторы (ВА). Чаще всего ВА построены на основе многофакторных регрессионных моделей [3, 4] или методов искусственного интеллекта [5- 8]. При добыче и транспортировке нефти происходит загрязнение природной среды, в частности, при аварийных ситуациях. В работе [9] приведены результаты исследования состава и свойств нефти, а также предложена методика оценки ее потенциального воздействия на геологическую среду при аварийных разливах.

Методы математического планирования эксперимента являются основными инструментами для систематического изучения влияния множества факторов на эффективность технологических процессов. Полный факторный эксперимент (ПФЭ) позволяет оценить влияние каждого параметра при проведении серии экспериментов. Ортогональный центральный композиционный план (ОЦКП) расширяет возможности моделирования за счет включения квадратичных членов в уравнение регрессии, что важно при исследовании нелинейных зависимостей вблизи оптимума. Эти подходы нашли широкое применение в оптимизации процессов очистки загрязненных объектов, разработки биотехнологических систем, а также в инженерных исследованиях, включая задачи нефтегазовой отрасли. В работе [10] методология поверхности отклика с использованием ОЦКП применена для оптимизации процесса удаления дизельного топлива из загрязненных почв методом промывки с добавлением ПАВ, усиленной аэрацией. Применение ОЦКП позволило оценить линейное влияние скорости потока воздуха, pH промывочного раствора, концентрации ПАВ (Brij 35) и скорости перемешивания на эффективность удаления дизельного топлива, а также выявить квадратичные эффекты (нелинейность отклика).

В исследовании [11] методология поверхности отклика (RSM) с использованием ОЦКП применена для изучения и оптимизации процесса очистки сточных вод нефтеперерабатывающего завода в реакторах периодического действия (SBR), как с добавлением порошкообразного активированного угля (РАС-SBR), так и без него (NРАС-SBR). Одним из двух независимых факторов, выбранных для оптимизации с помощью RSM/ОЦКП, был

тип аэрации. ОЦКП использован для разработки матрицы экспериментов, включающей комбинации различных типов аэрации и второго фактора – общего времени цикла реакции (4, 6 и 8 часов).

В работе [12] приведено применение планов второго порядка, в частности, ОЦКП Бокса, для построения и исследования моделей систем. Показан пример построения динамической модели электрической схемы в среде SimInTech для трех факторов. Приведены матрицы стандартного и ортогонального ОЦКП Бокса, формулы для расчета коэффициентов квадратичной модели по результатам эксперимента как в кодированных, так и в натуральных переменных. Результатом является получение уравнения регрессии второго порядка. В исследовании [13] для оптимизации условий культивирования алкалофильных бактерий *Raenibacillus mannanolyticus* применен метод ПФЭ, в ходе которого одновременно варьировались такие факторы, как источник углерода, его концентрация, аэрация, pH, температура и продолжительность культивирования. Уделяется внимание влиянию аэрации на синтез экзополисахарида, поскольку увеличение интенсивности перемешивания положительно сказывалось на вязкости культуральной жидкости.

В статье [14] рассматривается проблема повышения эффективности обессоливания и обезвоживания нефти, связанная с необходимостью эффективного удаления пластовой воды и солей перед транспортировкой и переработкой. Идея предлагаемой технологии заключается в том, что интенсивное диспергирование промывочной воды на мелкие капли увеличивает поверхность массообмена между водой и нефтью, что способствует более полному и быстрому извлечению солей и остаточной пластовой воды из нефтяной эмульсии. В рамках эксперимента варьировались параметры: исходное содержание солей и воды в нефти, расход промывочной воды и скорость струи промывочной воды на выходе. Физическое моделирование имеет важное значение в проведении экспериментов, научных исследований, в процессе обучения студентов.

**Постановка задачи.** Целью исследования является применение методов ОЦКП (случаи двухфакторного и трехфакторного эксперимента) для выявления влияния факторов на выходной параметр на примере объектов ТЭК. В первом случае эксперимент проводится на физической модели объекта, во втором – на имитационной модели.

**Методы исследования.** Ортогональным планом называется такой план, у которого матрица планирования  $X$  строится так, чтобы матрица  $C=X_t X$  оказалась диагональной. Используем этот подход и при построении планов второго порядка. План называется центральным, если все точки расположены симметрично относительно центра плана. ОЦКП – центральный симметричный ортогональный композиционный план.

В ОЦКП входят: ядро – план ПФЭ с  $N_0 = 2^n$  точками плана,  $n_0$  (одна для этого плана) центральная точка плана ( $x_i = 0, i = 1, 2, 3, \dots, n$ ) и по две «звездные» точки для каждого фактора:

$$x_i = \pm\alpha, x_j = 0, i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, n, i \neq j,$$

где  $\alpha$  – плечо «звездных» точек.

Для ОЦКП каждый фактор варьируется на 5 уровнях:  $-\alpha, -1, 0, 1, \alpha$ . Плечо звездных точек определяется по формуле [15]:

$$\alpha = \sqrt{\frac{1}{2}(\sqrt{N \cdot N_0} - N_0)}, \quad (1)$$

где  $N_0 = 2^n$  – число опытов ПФЭ.

Для каждого фактора  $X_i$  центр плана  $X_i^0$  определяется выражением:

$$X_i^0 = \frac{X_i^{max} + X_i^{min}}{2}, \quad (2)$$

где  $X_i^{max}, X_i^{min}$  – максимальное и минимальное значение фактора в физической величине.

Шаг варьирования  $i$ -физической переменной определяется по формуле:

$$h_i = \frac{X_i^{max} - X_i^{min}}{2 \cdot \alpha}. \quad (3)$$

Связь кодированных факторов с физическими определяется выражением:

$$x_i = \frac{X_i - X_i^0}{h_i}. \quad (4)$$

По результатам опытов плана формируется полином следующего вида:

$$\dot{Y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3 + b_4(x_1^2 - a) + b_5(x_2^2 - a) + b_6(x_3^2 - a). \quad (5)$$

Коэффициенты полинома  $b_0, b_1, b_2, b_3, b_{12}, b_{13}, b_{23}, b_{123}, b_4, b_5, b_6$  определяются по формуле:

$$b_i = \frac{\sum_{U=1}^N x_{iU} Y_U}{\sum_{U=1}^N x_{iU}^2}. \quad (6)$$

Смещение для квадратов факторов находится:

$$a = \sqrt{\frac{N_0}{N}}. \quad (7)$$

Значимость коэффициентов проверяют по критерию Стьюдента. Качество предсказания, обеспечиваемого полученной регрессионной моделью (5), оценивают по критерию Фишера  $F$  и коэффициенту детерминации  $R^2$  [16].

#### Обсуждение результатов. Первая задача – ОЦКП для случая двух факторов.

Эксперимент проводится на технологической установке циркулирования жидкости (рис. 1). В качестве имитации нефтесодержащей жидкости используется полиметилсилоксановая жидкость ПМС-100.

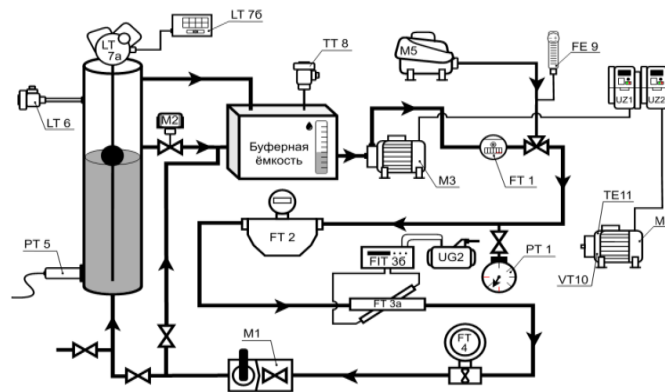


Рис. 1 – Схема установки  
 Fig. 1 – Installation diagram

На рис. 1 приведены следующие обозначения:

M1 – Регулирующий клапан SMART QT730622, M2 – Моторизированный шаровый кран Ujin CWX-25S, UZ1 – Преобразователь частоты A150 220 В 1 Ф 0,75 кВт 5 А ONI, M3 – Горизонтальный многоступенчатый насос Grundfos CM1-2, M5 – Поршневой безмаслянный компрессор с ресивером FUBAG, FE 9 – Ротаметр воздуха LZQ-5, PT 5 – Преобразователь гидростатического давления ПД100И, LT 7a – Поплавковый уровнемер ДУУ4МА-(ДУУ2М-01-0)-1,95-1, ЛIT 7б – Вторичный прибор БСД4, LT 6 – Вибрационный сигнализатор уровня Элемер-СВ-11/М1-D-НГ, FT 1 – Импульсный счетчик воды Ду20 Бетар СГВ-20 Д, FT 2 – Кориолисовый расходомер Эмис-Масс 260, FT 3a – Ультразвуковой преобразователь расхода УПР-025-G, FIT 3b – Ультразвуковой расходомер US-800, UG2 – Источник питания ИПТ-05-24, FT 4 – Турбинный расходомер РИЗУР-ДОТ Ду-10, PT 1 – Датчик избыточного давления АИР-10SH-ДИ, TT 8 – Термопреобразователь ТС-1088/1БГ-Р1100, UZ2 – Преобразователь частоты A150 220 В 1 Ф 0,75 кВт 5 А ONI, M4 – Электродвигатель АИР DRIVE 0,18 кВт, VT 10 – Датчики вибрации ДВСТ-4-30-2-К, TE 11 – Датчик температуры ДТС014-Pt100.В3.25/1,5.

В рамках эксперимента выбраны два фактора, существенно влияющих на эффективность циркуляции и качество обработки жидкости: скорость циркуляции ( $X_1$ ) и газовый фактор ( $X_2$ ). Газовый фактор, характеризующий объемное содержание газа в жидкости, оказывает значительное воздействие на гидродинамические и теплообменные процессы в системе, что особенно важно для моделирования реальных нефтесодержащих потоков [17]. Применение ортогонального центрального композиционного плана позволило провести

серию экспериментов с варьированием уровней факторов в широком диапазоне, обеспечивая при этом статистическую достоверность результатов и минимизацию взаимных корреляций между переменными. Это обеспечило возможность построения адекватной математической модели, описывающей зависимость ключевых показателей процесса от факторов  $X_1$  и  $X_2$ , включая их взаимодействие и нелинейные эффекты.

Анализ экспериментальных данных показал, что увеличение скорости циркуляции ( $X_1$ ) положительно сказывается на эффективности перемешивания, что можно выразить через уравнение:

$$Y = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_{12} X_1 X_2 + a_{11} X_1^2 + a_{22} X_2^2, \quad (8)$$

где  $Y$  – целевая функция (расход двухфазной смеси),  $a_0, a_1, a_2, a_{12}, a_{11}$  и  $a_{22}$  – коэффициенты, полученные в результате регрессионного анализа.

При этом увеличение скорости циркуляции способствует снижению градиентов концентрации и температуры, что в целом улучшает качество обработки жидкости. В то же время повышение газового фактора ( $X_2$ ) приводит к усложнению гидродинамического режима, проявляющемуся в увеличении пульсаций, нестабильности потока и потенциальном возникновении кавитационных явлений, что негативно влияет на стабильность и надежность процесса. Взаимодействие факторов выявило выраженные нелинейные эффекты: при низких скоростях циркуляции ( $X_1 < X_{1,0}$ ) увеличение газового фактора ( $X_2$ ) значительно ухудшает параметры процесса, тогда как при высоких скоростях циркуляции ( $X_1 > X_{1,0}$ ) влияние газа ослабевает за счет более интенсивного перемешивания и стабилизации потока. Это указывает на критическую роль оптимального подбора режимов работы для обеспечения устойчивого функционирования установки.

Построенная модель позволила определить оптимальные режимы эксплуатации технологической установки, обеспечивающие баланс между эффективностью циркуляции и допустимым уровнем газового насыщения. Например, оптимальные значения могут быть найдены с использованием метода градиентного спуска или других методов оптимизации, что позволяет минимизировать функцию потерь:

$$L = \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2, \quad (9)$$

где  $Y_i$  – наблюдаемые значения,  $\hat{Y}_i$  – предсказанные значения модели.

Данные результаты имеют высокую практическую значимость, поскольку в реальных нефтесодержащих системах присутствие газа неизбежно, и грамотное управление его влиянием является ключевым фактором для обеспечения устойчивой и безопасной работы оборудования.

Таким образом, применение ортогонального центрального композиционного плана совместно с использованием имитационной жидкости ПМС-100 позволило получить ценные и достоверные данные для оптимизации технологических процессов циркуляции и обработки нефтесодержащих жидкостей с учетом комплексного влияния скорости циркуляции и газового фактора. Полученные результаты могут служить основой для дальнейшего масштабирования исследований и внедрения оптимизированных режимов в промышленную практику, способствуя повышению эффективности и надежности технологических установок, а также анализ полученных данных позволит определить оптимальные области применения для каждого типа расходомеров в условиях присутствия газовой фазы и разработать методы компенсации погрешностей измерений.

Выполним построение уравнения регрессии с учетом ограничений в виде равенств и неравенств на факторы. В этом случае в качестве выходных параметров выступают расход и давление. Скорость циркуляции ( $X_1$ ) соответствует рабочей частоте насоса, а газовый фактор ( $X_2$ ) – скорости подачи воздуха в систему. Таким образом, для проведения эксперимента влияния входных параметров на расход и давления выбраны следующие независимые факторы: рабочая частота насоса (Гц) и скорость подачи воздуха в систему (л/мин). Частота насоса задавалась в системе через MASTER SCADA 4D. Регулирование подачи воздуха в систему осуществлялось через ротаметр.

Необходимо провести ОЦКП и составить уравнение двух моделей: расхода и давления в системе с помощью ОЦКП. Запись изменения расхода жидкости в системе фиксировались при помощи турбинного расходомера. Турбинный расходомер выбран, поскольку его принцип измерения основан на механическом вращении турбины, из-за чего он наименее чувствителен к влиянию двухфазных потоков по сравнению с кориолисовым и ультразвуковым расходомером. Давление в системе измерялось при помощи датчика избыточного давления. Дополнительно следует учитывать, при каких показателях целевых переменных жидкость начинает пениться, поскольку это влияет на корректность показаний приборов.

При числе факторов  $n = 2$  число опытов ПФЭ составляет  $N_0 = 2^2$ , число звёздных точек  $- 2 \cdot n = 4$ . Таким образом, общее число опытов:  $N = 4 + 4 + 1 = 9$ . Для расчета  $\alpha$  используем формулу (1). Для каждого фактора физический диапазон изменения задан. Заполним таблицу параметров ОЦКП (табл. 1).

**Таблица 1. Параметры ОЦКП**  
**Table 1. CPXP parameters**

| Параметры                                | Частота насоса (Гц) | Скорость подачи воздуха (л/мин) |
|--|---------------------|---------------------------------|
| Границы факторов                         | [45;50]             | [0;5]                           |
| Центр плана $X_i$                        | 47,5                | 2,5                             |
| Шаг варьирования $h_i$                   | 2,5                 | 2,5                             |
| Уровни (физические величины)             |                     |                                 |
| При кодированном уровне -1 (и $\alpha$ ) | 45                  | 0                               |
| При кодированном уровне 0                | 47,5                | 2,5                             |
| При кодированном уровне +1 (и $-a$ )     | 50                  | 5                               |

Константа преобразования  $a$  по формуле (7):  $a = \sqrt{\frac{N_0}{N}} = \sqrt{\frac{4}{9}} = \frac{2}{3} \approx 0,667$ .

Таким образом, параметры плана  $N_0 = 4, N = 9, \alpha = 1, a = \frac{2}{3}, 1 - a = \frac{1}{3}, -a = \frac{2}{3}, \alpha^2 - a = -\frac{2}{3}$ . Заполним матрицу планирования (табл. 2).

**Таблица 2. Матрица планирования**  
**Table 2. Planning matrix**

| $U$                     | $x_0$ | $x_1$ | $x_2$ | $x_1x_2$ | $x'_3 = \frac{x_3}{x_1 - a}$ | $x'_4 = \frac{x_4}{x_2 - a}$ | $Y_1$ | $\hat{Y}_1$ | $ \hat{Y}_1 - Y_1 $ | $Y_2$ | $\hat{Y}_2$ | $ \hat{Y}_2 - Y_2 $ |
|-------------------------|-------|-------|-------|----------|------------------------------|------------------------------|-------|-------------|---------------------|-------|-------------|---------------------|
| 1                       | +1    | -1    | -1    | +1       | $\frac{1}{3}$                | $\frac{1}{3}$                | 0,465 | 0,46        | 0,005               | 55,35 | 54,86       | 0,49                |
| 2                       | +1    | +1    | -1    | -1       | $\frac{1}{3}$                | $\frac{1}{3}$                | 0,544 | 0,5425      | 0,0015              | 61,10 | 61,32       | 0,22                |
| 3                       | +1    | -1    | +1    | -1       | $\frac{1}{3}$                | $\frac{1}{3}$                | 0,40  | 0,401       | 0,001               | 56,0  | 56,09       | 0,09                |
| 4                       | +1    | +1    | +1    | +1       | $\frac{1}{3}$                | $\frac{1}{3}$                | 0,56  | 0,565       | 0,005               | 73    | 73,8        | 0,8                 |
| 5                       | +1    | -1    | 0     | 0        | $\frac{1}{3}$                | $-\frac{2}{3}$               | 0,44  | 0,443       | 0,003               | 59    | 59,4        | 0,4                 |
| 6                       | +1    | +1    | 0     | 0        | $\frac{1}{3}$                | $-\frac{2}{3}$               | 0,57  | 0,566       | 0,004               | 72,5  | 71,483      | 1,017               |
| 7                       | +1    | 0     | -1    | 0        | $-\frac{2}{3}$               | $\frac{1}{3}$                | 0,49  | 0,496       | 0,006               | 56    | 56,27       | 0,27                |
| 8                       | +1    | 0     | +1    | 0        | $-\frac{2}{3}$               | $\frac{1}{3}$                | 0,485 | 0,478       | 0,007               | 64    | 63,12       | 0,88                |
| 9                       | +1    | 0     | 0     | 0        | $-\frac{2}{3}$               | $-\frac{2}{3}$               | 0,5   | 0,5001      | 0,0001              | 63    | 63,62       | 0,62                |
| $\sum_{U=1}^N x_{iU}^2$ | 9     | 6     | 6     | 4        | 2                            | 2                            |       |             |                     |       |             |                     |

Для случая двух факторов полином (5) преобразуется к виду:

$$\hat{Y}_1 = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_4(x_1^2 - a). \quad (10a)$$

Таким образом, по формулам (6) определяем параметры уравнения регрессии для расхода:

$$\hat{Y}_1 = 0,4948 + 0,0615x_1 - 0,009x_2 + 0,02025x_1x_2 + 0,00483\left(x_1^2 - \frac{2}{3}\right) - 0,01267\left(x_2^2 - \frac{2}{3}\right) = 0,500027 + 0,0615x_1 - 0,009x_2 + 0,02025x_1x_2 + 0,00483x_1^2 - 0,01267x_2^2 \quad (106)$$

Вычислим значения модели (106) по проведенным опытам и занесем результаты в табл. 2. Рассчитаем основные метрики с применением Python (табл. 3, столбец 1). Затем рассчитаем значения t-статистик для критерия Стьюдента (табл. 3, столбец 2).

**Таблица 3. Результаты расчета**  
**Table 3. Calculation results**

| Метрики<br>Metrics                               | Значения t-статистики<br>критерия Стьюдента<br>Student's t-test values |               |
|--|--|---------------|
| Метрики модели:                                  | <b>Коэффициент</b>   | <b>t_stat</b> |
| Остаточная сумма квадратов Qe: 0.000164          | 0  | b0 89.930874  |
| Общая сумма квадратов Qy: 0.025351               | 1  | b1 20.404013  |
| Коэффициент детерминации R <sup>2</sup> : 0.9935 | 2  | b2 -2.985953  |
| Критерий Фишера F: 92.4150                       | 3  | b12 5.485546  |
| Средняя относительная погрешность: 0.75%         | 4  | b3 0.925820   |
|  | 5  | b4 -2.426287  |

При уровне доверительной вероятности 0,95 и при 9 наблюдениях критическое значение  $t_{крит} = 2,306$ . Таким образом, все коэффициенты, кроме  $b_3$ , являются значимыми.

Критерий Фишера составил 92,4150. Определим критическое значение критерия Фишера. Число степеней свободы в числителе  $k_1 = p - 1 = 6 - 1 = 5$ .

Число степеней свободы в знаменателе  $k_2 = N - p = 9 - 6 = 3$ . Таким образом, по таблице критическое значение критерия Фишера составляет 9,01, что меньше вычисленного критерия Фишера, что доказывает адекватность модели. После преобразования получаем итоговую модель:

$$\hat{Y}_1 = 0,500027 + 0,0615x_1 - 0,009x_2 + 0,02025x_1x_2 - 0,01267x_2^2.$$

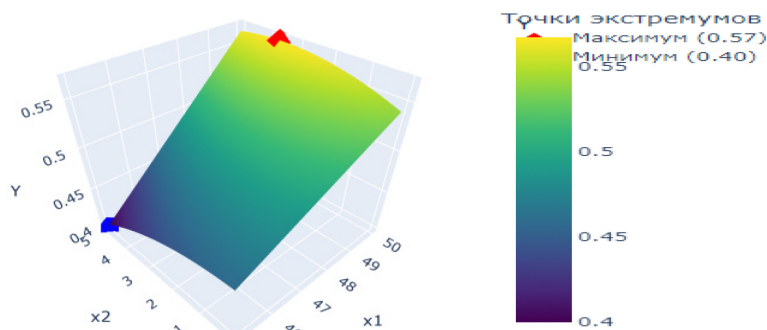
Решим задачу оптимизации, используя функцию *minimize* из библиотеки *SciPy* в Python для нахождения минимума и максимума. По завершении оптимизации алгоритм выведет следующий результат:

```

Максимум Y:
Оптимальная частота насоса x1 = 50.00 Гц
Оптимальное значение скорости подачи воздуха x2 = 3.61 л/мин
Максимальный расход Y = 0.57 м³/ч

Минимум Y:
Оптимальная частота насоса x1 = 45.00 Гц
Оптимальное значение скорости подачи воздуха x2 = 5.00 л/мин
Минимальный расход Y = 0.40 м³/ч
    
```

Также определяем, какие значения принимает расход при фиксированных заданных условиях частоты насоса и скорости подачи воздуха (рис. 2).



**Рис. 2 – Графическое решение задачи оптимизации: красная точка – максимум функции Y, синяя точка – минимум функции Y**

**Fig. 2 – Graphical solution of the optimization problem: the red point is the maximum of the function Y, the blue point is the minimum of the function Y**

Для максимизации расхода рекомендуется эксплуатировать оборудование при задании скорости подачи воздуха на уровне 3,61 л/мин, в то время как частота работы насоса

должна использовать максимально допустимое значение. В случае задачи минимизации расхода оптимальным является выполнение следующих условий: скорость подачи воздуха должна находиться на максимально возможном уровне, а частота работы насоса – на минимально допустимом. Аналогичным образом вычислены коэффициенты для второго уравнения регрессии, что позволило сформировать итоговый полиномиальный многочлен для давления:

$$\hat{Y}_2 = 62,22 + 6,042x_1 + 3,425x_2 + 2,8125x_1x_2 + 1,825\left(x_1^2 - \frac{2}{3}\right) - 3,925\left(x_2^2 - \frac{2}{3}\right).$$

При приведении слагаемых получаем:

$$\hat{Y}_2 = 63,62 + 6,042x_1 + 3,425x_2 + 2,8125x_1x_2 + 1,825x_1^2 - 3,925x_2^2.$$

Решим задачу максимизации расхода при ограничении значения давления в виде неравенства. Запишем задачу в векторной форме. Обозначим вектор переменных через  $X = (x_1, x_2)$ . Тогда задачу оптимизации можно написать следующим образом:

$$\begin{cases} f(x) \rightarrow \max_x Y_1(X), \\ g_1(X) = P_{min} - Y_2(X) \leq 0, \\ g_2(X) = Y_2(X) - P_{max} \leq 0, \\ 45 \leq x_1 \leq 50, \\ 0 \leq x_2 \leq 5. \end{cases}$$

Примем  $P_{min}$  за 50 кПа,  $P_{max} = 80$  кПа. Напишем код для решения задачи оптимизации. Получим результат:

```
Оптимизация прошла успешно:
Оптимальная частота насоса x1 = 50.00 Гц
Оптимальная подача воздуха x2 = 3.61 л/мин
Максимальный расход = 0.5716 м³/ч
Давление при этом = 74.18 кПа
```

**Вторая задача – ОЦКП для случая трех факторов.** Эффективность процесса ректификации нефти во многом зависит от минимизации энергопотребления при разделении смесей. Для анализа того, как различные факторы влияют на энергозатраты в условиях маломощной установки, применяется специальный метод исследования – ОЦКП. Разработанная имитационная секционная модель нефтеперерабатывающей установки служит основой для проведения экспериментов [18]. Энергетические затраты на разделение состоят из подвода энергии для создания парового потока и затрат на охлаждение и конденсацию потока орошения и нефтепродуктов. На маломощную установку ректификации нефти тепло подается с помощью перегретого водяного пара, а отводится через аппарат воздушного охлаждения (АВО). Выходным параметром является тепловая нагрузка АВО  $Q_{АВО}$ .

Влияющими факторами являются расход перегретого водяного пара  $Z$ , флегмовое число  $\Phi$ , потенциальное содержание светлых фракций в сырье (нефти)  $PS$ .

Зависимость энергетических затрат от влияющих факторов имеет следующий вид:

$$Q_{АВО} = f(Z, \Phi, PS). \quad (11)$$

В этом случае при проведении ОЦКП число точек факторного пространства равно 15. Трехфакторный эксперимент выполнен в следующей последовательности.

На первом шаге по общеизвестным формулам определены центр плана  $X^0_i$ , шаг варьирования  $h_i$ , звездное плечо  $\alpha$ , смещение значений квадратов факторов  $a$ , уровни варьирования  $(-\alpha, 1, 0, +1, \alpha)$ . Для случая трех факторов звездное плечо  $\alpha=1,215$ ; параметр смещения  $a=0,73$ . Перечисленные параметры ОЦКП вычислены и приведены в табл. 4.

На втором шаге выполнено построение матрицы планирования с учетом найденных на первом шаге параметров ОЦКП. Значения выходного параметра  $y=Q_{АВО}$  определены по имитационной секционной модели. Матрица планирования для трехфакторного эксперимента составлена по аналогии с предыдущим случаем.

**Таблица 4. Параметры ОЦКП**  
**Table 4. CPXP parameters**

| X <sub>i</sub> | Границы факторов<br>Factor boundaries | x <sub>i</sub> | h <sub>i</sub> | Уровни варьирования Levels of variation |        |                             |        |     |
|----------------|---------------------------------------|----------------|----------------|---|--------|-----------------------------|--------|-----|
|                |                                       |                |                | -a                                      | -1     | X <sup>0</sup> <sub>i</sub> | +1     | a   |
| Z, %           | [3; 5]                                | x <sub>1</sub> | 0,823          | 3                                       | 3,177  | 4                           | 4,823  | 5   |
| Φ              | [1,2; 1,6]                            | x <sub>2</sub> | 0,165          | 1,2                                     | 1,235  | 1,4                         | 1,565  | 1,6 |
| PS, %          | [48; 52]                              | x <sub>3</sub> | 1,646          | 48                                      | 48,354 | 50                          | 50,646 | 52  |

По результатам опытов полученного плана сформирован квадратичный полином:

$$y(\vec{x}) = b_0^*x_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + \dots \\ \dots + b_{23}x_2x_3 + b_4(x_1^2 - a) + b_5(x_2^2 - a) + b_6(x_3^2 - a), \quad (12a)$$

где  $b_1$ - $b_3$  – коэффициенты влияния одиночных факторов;  $b_{12}$ ,  $b_{13}$ ,  $b_{23}$  – коэффициенты взаимного влияния пар факторов;  $b_4$ - $b_6$  – коэффициенты влияния квадратов факторов;  $x_0$ - $x_3$  – кодированные факторы;  $a$  – смещение значений квадратов факторов;  $y$  – выходной параметр.

Коэффициенты уравнения регрессии (12a) вычислены по формулам:

$$b_i = \frac{\sum_{j=1}^N x_{ij}y_j}{\sum_{j=1}^N x_{ij}^2}; \quad i = \overline{0, 6}; \quad j = \overline{1, 15}.$$

После проверки значимости  $b$ -коэффициентов и исключения из модели незначимых коэффициентов осуществлено преобразование уравнения регрессии (12a) в стандартную форму:

$$y(\vec{x}) = b_0x_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{13}x_1x_3 + b_4x_1^2 + b_5x_2^2 + b_6x_3^2, \quad (12б)$$

где  $b_0 = b_0^*x_0 - a(b_4 + b_5 + b_6)$ .

Рассчитанные значения  $b$ -коэффициентов записаны в уравнение (12б):

$$y(\vec{x}) = 13754,12 + 894,78x_1 - 75,50x_2 - 83,09x_3 - 27,63x_1x_3 + 20,89x_1^2 + 25,29x_2^2 + 30,37x_3^2.$$

На третьем шаге выполнена проверка адекватности полученной модели. При оценке адекватности модели принято, что параллельных опытов нет. Эксперимент проводился на компьютерной модели. Проведение параллельных опытов приводило к одним и тем же результатам. Проверка адекватности модели (12б) выполнена по критерию Фишера. Табличное значение критерия Фишера  $F_{\text{табл}}$  определено с помощью функции Matlab  $\text{finv}(\alpha, f_1, f_2)$ .  $F_{\text{табл}}=3,9823$ . Расчетное значение отношения дисперсии среднего и остаточной дисперсии превышает табличное значение, следовательно, модель (12б) адекватна исходным данным.

**Вывод.** В рамках проведенного исследования успешно реализован ОЦКП для двухфакторного и трехфакторного экспериментов, позволивший построить адекватные квадратичные регрессионные модели. Решены задачи оптимизации расхода и давления в системе транспортировки жидкости в диапазоне скорости воздуха [0; 5] л/мин и оптимизации процесса ректификации нефти на установке малой мощности. Полученные модели подтвердили свою эффективность высокими значениями критерия Фишера и значимостью большинства коэффициентов регрессии по критерию Стьюдента.

В первом случае решена задача максимизации расхода жидкости при ограничении давления согласно выведенной формуле (10б). Проведенная на основе полученных моделей оптимизация показала оптимальные режимы эксплуатации установки для достижения как максимальных, так и минимальных значений выходных параметров. Полученные результаты показывают, что скорость подачи воздуха влияет на расход и давление в системе. Такая методика применения ОЦКП может быть полезна при проектировании и эксплуатации процессов, где происходит смешение и аэрация, например, в химической, биотехнологической и пищевой промышленности. Результаты можно применить при оценке негативного влияния газовых включений в процессах ТЭК, также они могут быть основой для проверки моделей для других жидкостей с похожими свойствами.

Во втором случае полученная на основе ОЦКП адекватная регрессионная модель (12б) может быть применена для оптимизации процесса ректификации нефти по критерию энергетических затрат. Объект применения – установки ректификации нефти малой мощности. С помощью выведенной формулы (12б) можно определять оптимальные показатели потребления перегретого водяного пара и флегмового числа при изменении исходного состава нефти. Температуры начала и конца кипения нефтепродуктов являются нормируемыми показателями качества и выступают как ограничивающие условия в процессе оптимизации.

#### Библиографический список:

1. Рудин М.Г., Сомов В.Е., Фомин А.С. Карманный справочник нефтепереработчика. М.: ЦНИТТ-Энефтехим, 2004. 336 с.
2. Tugashova L., Bazhenov R., etc. Approximation method for the potential composition of petroleum fractions // *E3S Web of Conferences*. 2024. Vol. 471. 03003.
3. Andrijic Z.U., Cvetnic M., Bolf N. Soft sensor models for a fractionation reformat plant using small and bootstrapped data sets // *Brazilian Journal Of Chemical Engineering*. 2018. Vol. 35. P. 745–756. DOI: 10.1590/0104-6632.20180352s20150727.
4. Тугашова Л.Г., Затонский А.В. Исследование качества нефтепродуктов с применением моделей // *Химическая физика и мезоскопия*. 2019. Т. 21. № 4. С. 551-564.
5. Herceg S., Andrijic Z.U., Bolf N. Support Vector Machine-based Soft Sensors in the Isomerisation Process // *Chemical and Biochemical Engineering Quarterly*. 2021. Vol. 34(4). P. 243–255. DOI: 10.15255/CABEQ.2020.1825.
6. Gao Shuzhi, Li Xiaoyu, Zhang Yimin, Wang Jun. A soft-sensor model of VCM rectification concentration based on an improved WOA-RBFNN // *Measurement Science And Technology*. 2021. Vol. 32(8). DOI: 10.1088/1361-6501/abf8ed.
7. Wei Anran, Ye Han, Guo Zhenlin, Xiong Jie SISO-assisted prediction and design of mechanical properties of porous graphene with a uniform nanopore array. *Nanoscale Adv.* 2022. Vol. 4(5). P. 1455-1463. DOI: 10.1039/d1na00457c.
8. Fujii K., Yamamoto T. Development of a Nonlinear Soft Sensor Using a GMDH Network for a Refinery Crude Distillation Tower. *Electrical Engineering in Japan*. 2014;188:31-38. DOI: 10.1002/ej.22459.
9. Губайдуллин М.Г., Крайнева О.В. Экспертная оценка потенциального воздействия нефти на геологическую среду прибрежной зоны юго-восточной части Баренцева моря // *НТЖ «Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе»*. М:ВНИИОЭНГ. 2014. № 4. С. 9-14.
10. Ayele B., Lu J., Chen Q. Optimization of aeration enhanced surfactant soil washing for remediation of diesel-contaminated soils using response surface methodology // *PeerJ*. 2020. Vol. 8. DOI: 10.7717/peerj.8578.
11. Aziz S.Q., Fakhri I.S. Optimization of aeration style and cycle time for treatment of oil refinery wastewater using powdered activated carbon and sequential batch reactor. *ZANCO Journal of Pure and Applied Sciences*. 2017;29(4.):140-153.
12. Беклемищев Ф.С., Селиванова В.А. Построение и исследование модели с использованием ортогонального центрального композиционного плана Бокса в среде SIMINTECH // *Инициатива в науке как новая стратегия развития системы знаний: сб. науч. тр.* Казань: ООО «СитИвент», 2019. С. 248-257.
13. Аптикаева А.А. Оптимизация условий культивирования штамма алкалофильных бактерий *Raenibacillus mannanolyticus* – продуцента вязкого экзополисахарида // *Современные проблемы науки и образования*. 2015. № 3. С. 593.
14. Вальшин И.Р. Новые методы интенсификации массообменных процессов при обессоливании нефти // *Нефть. Газ. Новации*. 2018. № 5. С. 24-29.
15. Сазонникова Н.А. Управление технологическими процессами: электрон. учеб. пособие. Самара: Издательство Самарского университета, 2017. 192 с.
16. Затонский А.В., Тугашова Л.Г. Моделирование объектов управления в MatLab: учеб. пособие. СПб.: Издательство «Лань», 2022. 144 с.
17. Абрамов Г.С., Сарычев А.В. Практическая расходомерия в нефтяной промышленности. М: ОАО «ВНИИОЭНГ», 2002. 144 с.
18. Дмитриевский Б.С., Затонский А.В., Тугашова Л.Г. Задача управления процессом ректификации нефти и метод ее решения // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2018. Т. 329. № 2. С. 136-145.

#### References:

1. Rudin M.G., Somov V.E., Fomin A.S. Pocket handbook of the oil refiner. Moscow: TSNITTEneftkhim; 2004:336 p. (In Russ)
2. Tugashova L., Bazhenov R., etc. Approximation method for the potential composition of petroleum fractions. *E3S Web of Conferences*. 2024; 471. 03003.

3. Andrijic Z.U., Cvetnic M., Bolf N. Soft sensor models for a fractionation reformat plant using small and bootstrapped data sets. *Brazilian Journal Of Chemical Engineering*. 2018;35:745–756. DOI: 10.1590/0104-6632.20180352s20150727.
4. Tugashova L.G., Zatonsky A.V. Investigation of petroleum-product quality using models. *Chemical Physics and Mesoscopy*. 2019;21(4):551–564. (In Russ)
5. Herceg S., Andrijic Z.U., Bolf N. Support Vector Machine-based Soft Sensors in the Isomerisation Process *Chemical and Biochemical Engineering Quarterly*. 2021;34(4):243–255. DOI: 10.15255/CABEQ.2020.1825.
6. Gao Shuzhi, Li Xiaoyu, Zhang Yimin, Wang Jun. A soft-sensor model of VCM rectification concentration based on an improved WOA-RBFNN. *Measurement Science and Technology*. 2021;32(8). DOI: 10.1088/1361-6501/abf8ed.
7. Wei Anran, Ye Han, Guo Zhenlin, Xiong Jie SISSO-assisted prediction and design of mechanical properties of porous graphene with a uniform nanopore array. *Nanoscale Adv.* 2022; 4(5):1455-1463. DOI: 10.1039/d1na00457c.
8. Fujii K., Yamamoto T. Development of a Nonlinear Soft Sensor Using a GMDH Network for a Refinery Crude Distillation Tower. *Electrical Engineering in Japan*. 2014;188: 31-38. DOI: 10.1002/ej.22459.
9. Gubaidullin M.G., Krayneva O.V. Expert assessment of the potential impact of oil on the geological environment of the coastal zone of the southeastern Barents Sea. *Environmental Protection in the Oil and Gas Complex*. Moscow: All-Russian Scientific Research Institute for Organization, Management and Economics of the Oil and Gas Industry (VNIIOENG); 2014;(4):9-14. (In Russ)
10. Ayele B., Lu J., Chen Q. Optimization of aeration enhanced surfactant soil washing for remediation of diesel-contaminated soils using response surface methodology. *PeerJ*. 2020; 8. DOI: 10.7717/peerj.8578.
11. Aziz S.Q., Fakhri I.S. Optimization of aeration style and cycle time for treatment of oil refinery wastewater using powdered activated carbon and sequential batch reactor. *ZANCO Journal of Pure and Applied Sciences*. 2017; 29( 4):140-153.
12. Beklemishchev F.S., Selivanova V.A. Construction and investigation of a model using Box’s orthogonal central composite design in the Simintech environment. In: Initiative in Science as a New Strategy for the Development of the Knowledge System: Proc. of Sci. Works. Kazan: SitIvent LLC; 2019:248–257. (In Russ)
13. Aptikaeva A.A. Optimization of cultivation conditions of the alkalophilic bacterium strain *Paenibacillus mannanolyticus* – producer of viscous exopolysaccharide. *Modern Problems of Science and Education*. 2015;(3):593. (In Russ)
14. Valshin I.R. New methods of intensification of mass-transfer processes in oil desalting. *Oil. Gas. Innovations*. 2018; (5):24–29. (In Russ)
15. Sazonnikova N.A. Management of technological processes: electronic textbook. Samara: Samara University Publishing; 2017:192 p. (In Russ)
16. Zatonsky A.V., Tugashova L.G. Modeling of control objects in MatLab: textbook. St. Petersburg: Lan Publishing; 2022:144 p. (In Russ)
17. Abramov G.S., Sarychev A.V. Practical Flowmetering in Oil Industry: textbook. Moscow: JSC op. «VNIIOENG»; 2002: 460 p. (In Russ)
18. Dmitrievsky B.S., Zatonsky A.V., Tugashova L.G. Control problem of oil rectification process and its solution method. *Bulletin of Tomsk Polytechnic University. Georesources Engineering*. 2018; 329(2):136–145. (In Russ)

#### Сведения об авторах:

Тугашова Лариса Геннадьевна, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизации и информационных технологий; [tugashova@yandex.ru](mailto:tugashova@yandex.ru); ORCID: 0000-0001-9331-3142

Ситдикова Ирина Петровна, кандидат технических наук, заведующий кафедрой автоматизации и информационных технологий; [sitdikova\\_ip@mail.ru](mailto:sitdikova_ip@mail.ru)

Латипов Булат Наилевич, магистрант кафедры автоматизации и информационных технологий; [latipov.2002bulat@mail.ru](mailto:latipov.2002bulat@mail.ru)

#### Information about authors:

Larisa G. Tugashova, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Department of Automation and Information Technology; [tugashova@yandex.ru](mailto:tugashova@yandex.ru); ORCID: 0000-0001-9331-3142

Irina P. Sitdikova, Cand. Sci. (Eng.), Head of the Department of Automation and Information Technology; [sitdikova\\_ip@mail.ru](mailto:sitdikova_ip@mail.ru)

Bulat N. Latipov, Master's Student, Department of Automation and Information Technology; [latipov.2002bulat@mail.ru](mailto:latipov.2002bulat@mail.ru)

#### Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 30.07.2025.

Одобрена после рецензирования/Revised 01.09.2025.

Принята в печать /Accepted for publication 01.11.2025.

**Автоматизация процесса армирования железобетонных конструкций в программе Autodesk Revit с использованием Dynamo Studio**

**Т.А. Юрошева<sup>1</sup>, Н.С. Исупов<sup>2</sup>, Ш.Р. Кудзиев<sup>1</sup>, Е.Н. Акоева<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Северо – Кавказский горно-металлургический институт  
(Государственный технологический университет),

<sup>1</sup>362021, г. Владикавказ, ул. Николаева, 44, Россия,

<sup>2</sup> Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,  
<sup>2</sup>620002, г. Екатеринбург, ул. Мира 19, Россия

**Резюме. Цель.** Целью работы является исследование возможностей программы Dynamo Studio как инструмента для автоматизации проектирования систем армирования в Revit и разработка алгоритмов армирования различных конструктивных элементов: балок, колонн и плит перекрытий. **Метод.** Исследования основано на методах автоматизация процесса армирования железобетонных конструкций в программе Autodesk Revit с использованием Dynamo Studio. В работе детально рассмотрены принципы работы с основными нодами и геометрическими параметрами элементов. **Результат.** Разработаны методики создания арматурных каркасов для балок, колонн и плит перекрытий с учетом их конструктивных особенностей, и геометрических параметров. Представлено подробное описание алгоритмов армирования балок, колонн и плит перекрытий. Описаны основные ноды и последовательность действий при создании арматурных каркасов. **Вывод.** Результаты исследования демонстрируют возможность эффективного автоматизированного проектирования систем армирования железобетонных конструкций. Применение Dynamo Studio для автоматизации процесса армирования существенно повышает производительность труда и обеспечивает высокое качество проектной документации. Результаты исследования могут служить основой для создания более сложных автоматизированных систем проектирования арматурных конструкций. Выводы подтверждают практическую значимость полученных результатов, которые могут быть использованы проектировщиками при разработке строительных конструкций.

**Ключевые слова:** автоматизация проектирования, армирование, железобетонные конструкции, Dynamo, Revit, арматурные каркасы

**Для цитирования:** Т.А. Юрошева, Н.С. Исупов, Ш.Р. Кудзиев, Е.Н. Акоева. Автоматизация процесса армирования железобетонных конструкций в программе Autodesk Revit с использованием Dynamo Studio. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025;52(4):165-180. DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-4-165-180

**Automation of the reinforcement of reinforced concrete structures in the Autodesk Revit program using Dynamo Studio**

**T.A. Yurosheva<sup>1</sup>, N.S. Isupov<sup>2</sup>, Sh.R. Kudziev<sup>1</sup>, E.N. Akoeva<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy  
(State Technological University),

44 Nikolaeva Str., Vladikavkaz 362011, Russia,

<sup>2</sup> B.N. Yeltsin first President of Russia Ural Federal University,  
19 Mira Str., Ekaterinbur 620002, Russia

**Abstract. Objective.** The aim of the work is to study the capabilities of the Dynamo Studio program as a tool for automating the design of reinforcement systems in Revit and to develop

algorithms for reinforcing various structural elements: beams, columns, and floor slabs. **Method.** The study is based on methods for automating the reinforcement process of reinforced concrete structures in Autodesk Revit using Dynamo Studio. The paper considers the principles of working with the main nodes and geometric parameters of elements. **Result.** Methods for creating reinforcement cages for beams, columns, and floor slabs have been developed, taking into account their design features and geometric parameters. Algorithms for reinforcing beams, columns, and floor slabs are described. The main nodes and the sequence of actions for creating reinforcement cages are described. **Conclusion.** The results of the study demonstrate the possibility of effective automated design of reinforcement systems for reinforced concrete structures. The use of Dynamo Studio to automate the reinforcement process significantly increases labor productivity and ensures high-quality design documentation. The results of the study can serve as the basis for creating complex automated systems for the design of reinforcement structures. The findings confirm the practical significance of the results obtained and can be used by designers when developing building structures.

**Keywords:** design automation, reinforcement, reinforced concrete structures, Dynamo, Revit, reinforcement frames

**For citation:** T.A. Yurosheva, N.S. Isupov, Sh.R. Kudziev, E.N. Akoeva. Automation of the reinforcement of reinforced concrete structures in the Autodesk Revit program using Dynamo Studio. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2025;52(4):165-180. (In Russ) DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-4-165-180

**Введение.** В современных условиях проектирования строительных конструкций особую актуальность приобретает автоматизация процессов армирования железобетонных элементов. Использование программного обеспечения для создания арматурных каркасов позволяет существенно сократить время проектирования и минимизировать вероятность ошибок [1].

**Постановка задачи.** Целью данной работы является исследование возможностей программы Дупано как инструмента для автоматизации проектирования систем армирования в Revit. В ходе исследования были поставлены задачи по разработке алгоритмов армирования различных конструктивных элементов: балок, колонн и плит перекрытий.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Исследовать и проанализировать существующие методы и алгоритмы армирования железобетонных конструкций;
2. Разработать алгоритм автоматизированного проектирования арматурных каркасов для: балок с возможностью определения геометрических параметров и создания арматурного каркаса с заданными характеристиками; колонн с построением местной системы координат и автоматизированным размещением продольных стержней; плиты перекрытия с автоматическим определением верхней грани и формированием арматурного каркаса;
3. Создать комплексную методику автоматизированного проектирования, включающую: определение геометрических параметров элементов и расчет необходимых параметров армирования; формирование арматурного каркаса с учетом конструктивных особенностей; выбор типа арматуры и способа загибки;
4. Разработать систему нодов для: получения параметров элементов; построения геометрии арматурного каркаса; создания арматурных стержней и хомутов; формирования арматурного каркаса в целом;
5. Провести тестирование разработанной системы на различных типах железобетонных конструкций, оценить эффективность предложенного решения и его практическую применимость;
6. Разработать рекомендации по использованию созданной системы в проектной деятельности.

Решение поставленных задач позволило создать эффективный инструмент

для автоматизации процесса проектирования армирования железобетонных конструкций, что существенно повысит производительность труда проектировщиков и обеспечит высокое качество проектной документации.

Научная новизна результатов исследования заключается в следующем:

1. Впервые разработана комплексная методика автоматизированного проектирования систем армирования железобетонных конструкций, объединяющая возможности программ Revit и Dynamo в единый технологический процесс.
2. Предложен инновационный алгоритм создания арматурных каркасов, включающий автоматизированное определение геометрических параметров элементов и формирование арматурного каркаса с использованием семейства нодов Geometry, Element и CodeBlock.
3. Разработана оригинальная система построения местной системы координат для армирования колонн с применением нода Vector.ByTwoPoints, позволяющая оптимизировать процесс размещения продольных арматурных стержней.
4. Создан новый подход к проектированию армирования перекрытий с использованием нодов Curve и Geometry для определения лучей армирования и формирования арматурных стержней.
5. Впервые внедрен метод автоматизированного расчета параметров армирования (длина, ширина, высота элементов) с помощью нода Element.Get ParameterValue By Name, что позволяет существенно повысить точность проектирования.
6. Предложена усовершенствованная технология создания арматурных каркасов с возможностью выбора стиля армирования, типа арматуры и типа загибки через пакет DynamoForRebar.

Практическая значимость полученных результатов заключается в создании эффективного инструмента для автоматизации процесса проектирования армирования железобетонных конструкций, что позволяет значительно сократить время проектирования и повысить качество проектной документации.

**Методы исследования.** Алгоритмы процесса армирования каркасов для железобетонных конструкций

**Армирование балок.** Инициализация алгоритма осуществляется посредством селекции идентификатора требуемой балки. Последующий этап предусматривает детерминирование геометрических характеристик элемента посредством интеграции семейства нодов Geometry, Element и CodeBlock, в рамках которого осуществляется квантификация линейных размеров балки - протяженности и ширины [2].

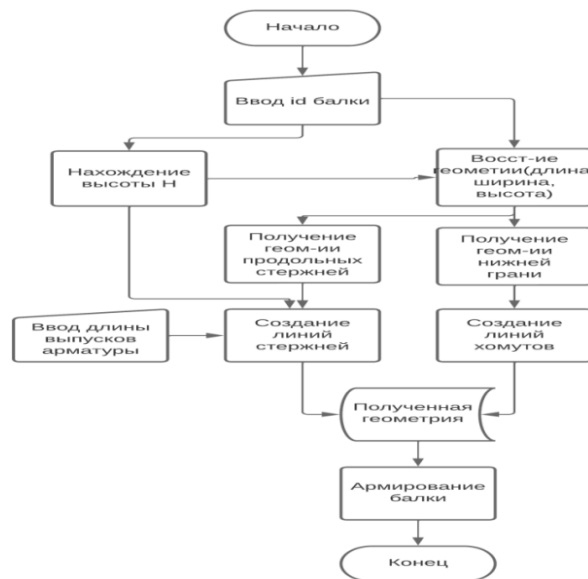
Параллельно производится определение высотного параметра конструкции путем экстракции отметок верхней и нижней граней с последующим вычислением их разности, что позволяет установить искомое значение высоты  $H$ .

По завершении этапа геометрического анализа осуществляется переход к формированию арматурного каркаса. Вектор распространения массива хомутов задается посредством нода Vector.ByTwoPoints. Конфигурация массива хомутов реализуется путем спецификации межцентрового расстояния и необходимых геометрических параметров, что обеспечивает генерацию требуемых линий хомутов.

Последующее формирование геометрии продольных стержней и хомутов осуществляется с учетом селекции соответствующего стиля и типа арматурного каркаса, при этом предусматривается возможность анкеровки арматурных элементов посредством использования дополнения DynamoForRebar.

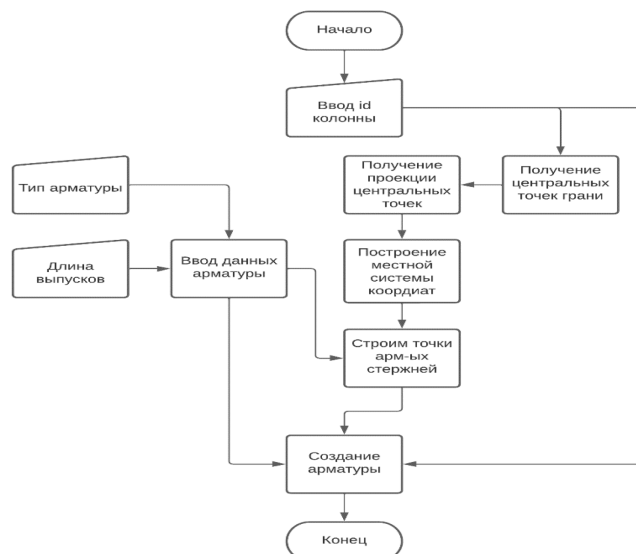
Финальная стадия алгоритма реализуется посредством Python.Script, обеспечивающего формирование армированной конструкции балки. Функциональную схему скрипта можно видеть на рис. 1.

**Армирование колонн.** Процесс инициализации алгоритма начинается с экстракции граней колонны и последующей калькуляцией их центроидов.



**Рис.1 – Функциональная схема скрипта армирования балки**  
**Fig. 1 – Functional diagram of the beam reinforcement script**

На последующем этапе осуществляется определение точки нижней торцевой грани посредством использования координат нижней торцевой грани  $Z$  и центраида соответствующей грани, при этом финальная стадия данного этапа реализуется через нод Code Block, выполняющий функцию извлечения первого элемента из сформированного списка [3-5]. Последующий этап алгоритма предусматривает определение центроидов боковых граней с последующим их проецированием на плоскость нижнего торца конструкции. Формирование локальной системы координат осуществляется посредством применения нода Vector.ByTwoPoints. В рамках установленной системы координат производится позиционирование точек размещения продольных арматурных стержней. Формирование массива стержней реализуется через создание списка элементов с последующей селекцией требуемого типа арматуры из кодового перечня. На следующем этапе осуществляется спецификация размеров выпусков и интервалов между стержнями для обеспечения корректной установки продольных арматурных элементов. Заключительная стадия алгоритма предусматривает интеграцию всех предварительно определенных параметров в блок создания арматуры, что обеспечивает генерацию арматурных стержней. Функциональная схема алгоритма представлена на рис. 2.



**Рис. 2 – Функциональная схема скрипта армирования колонн**  
**Fig. 2 – Functional diagram of the column reinforcement script**

**Армирование перекрытия.** В рамках реализации алгоритма проектирования арматурного каркаса плиты перекрытия, представленного на рис. 3, осуществляется последовательная обработка идентификатора конструктивного элемента. На начальном этапе производится экстракция геометрических характеристик плиты посредством получения массива её граней. В процессе обработки данных особое внимание уделяется определению верхней поверхности перекрытия, что достигается путем обращения к последнему элементу сформированного списка посредством нода List.LastItem.

Последующий этап алгоритма предусматривает генерацию системы направляющих векторов, реализуемую посредством интеграции узлов Curve и Geometry. Данная операция обеспечивает формирование массива лучей, необходимых для корректного позиционирования арматурных элементов в пространстве.

Финальная стадия проектирования характеризуется комплексной обработкой параметров армирования с использованием специализированного пакета DynamoForRebar. В рамках данного этапа осуществляется многоаспектная настройка характеристик арматурного каркаса, включающая: селекцию типоразмера арматурных стержней; определение методики анкеровки арматурных элементов; спецификацию геометрической конфигурации арматурных стержней.

Результатом последовательной реализации описанного алгоритма является формирование полноценного арматурного каркаса плиты перекрытия, соответствующего проектным требованиям и нормативным документам.

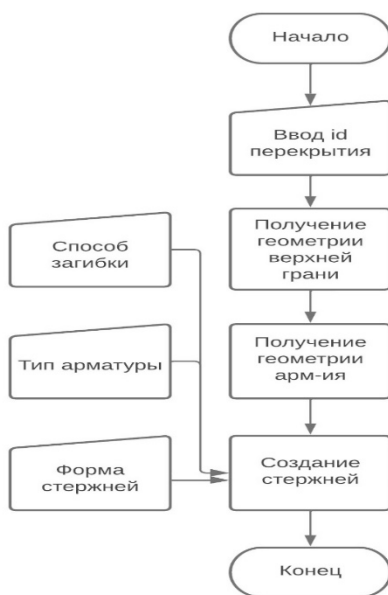


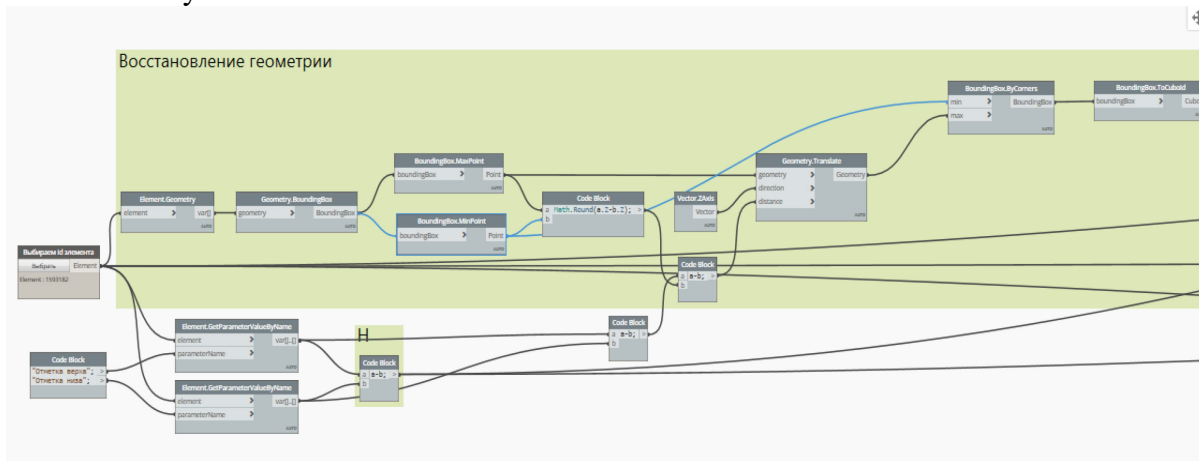
Рис. 3 – Функциональная схема скрипта армирования перекрытия  
Fig. 3 – Functional diagram of the floor reinforcement script

**Обсуждение результатов. Армирование балок.** В процессе инициализации алгоритма проектирования, показанного на рис. 4, осуществляется первичная селекция конструктивного элемента посредством нода Revit.Selection, что обеспечивает идентификацию требуемой балки в рамках программного модуля.

Последующий этап характеризуется комплексной обработкой геометрических параметров элемента, реализуемой посредством интеграции семейства узлов Geometry, Element и CodeBlock [6]. В результате данной операции производится квантификация линейных размеров балки, включающая определение её протяженности и ширины.

Параллельно с геометрическим анализом осуществляется детерминирование высотного параметра конструкции. Данный процесс реализуется посредством нода Element.GetParameterValueByName, обеспечивающего получение абсолютных отметок верхней и нижней поверхностей балки. Финальная стадия определения высотного

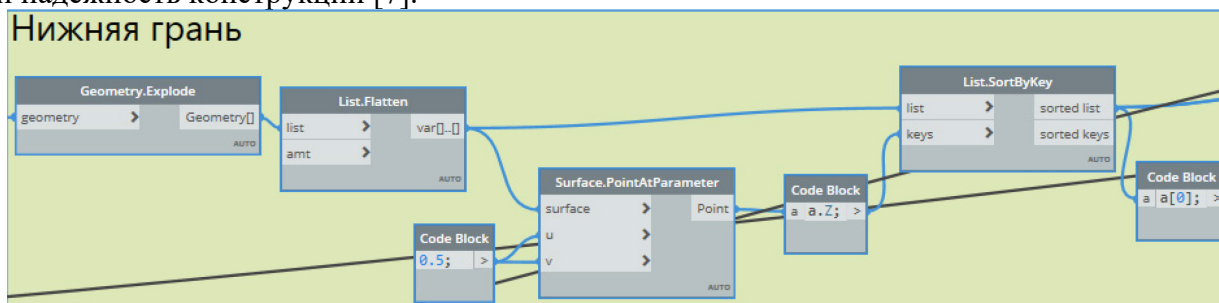
параметра предусматривает вычисление разности между полученными значениями, что позволяет установить искомое значение высоты  $H$ .



**Рис. 4 – Восстановление геометрии балки**  
**Fig. 4 – Restoration of beam geometry**

По завершении этапа определения базовых геометрических характеристик осуществляется экстракция конфигурации нижней поверхности балки, что представляет собой финальный этап геометрического анализа конструкции. После успешной реализации данного этапа происходит переход к формированию арматурного каркаса, который включает в себя комплекс операций по проектированию и размещению арматурных элементов в соответствии с расчетными требованиями и нормативными документами (рис. 5).

Данный переход от геометрического анализа к проектированию армирования является логическим продолжением алгоритма, где на основе полученных геометрических параметров формируется арматурный каркас, обеспечивающий необходимую прочность и надежность конструкции [7].



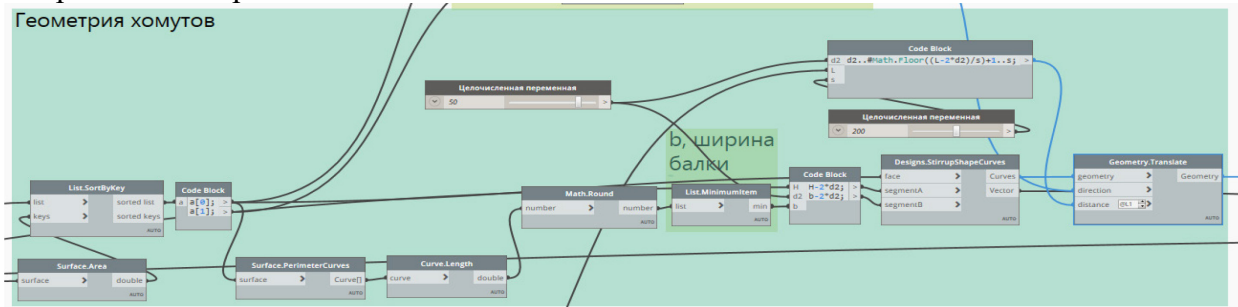
**Рис. 5 – Нахождение нижней грани балки**  
**Fig. 5 – Finding the lower edge of the beam**

На начальном этапе проектирования поперечного армирования осуществляется определение направления распространения массива хомутов. Данная операция реализуется посредством ноды `Vector.ByTwoPoints`, который обеспечивает генерацию вектора, определяющего ориентацию арматурного каркаса в пространстве (детализация процесса на рис. 6). Последующий этап характеризуется формированием массива хомутов, при котором осуществляется спецификация следующих параметров:

1. Межцентровое расстояние между элементами поперечного армирования.
2. Геометрические характеристики арматурных элементов.
3. Конфигурация размещения хомутов в пространстве.

В результате комплексной обработки указанных параметров формируется объект `Geometry.Translate`, содержащий полный набор геометрических примитивов, описывающих конфигурацию поперечного армирования конструкции. Данный объект представляет собой совокупность линий, определяющих пространственное расположение хомутов в арматурном каркасе.

Таким образом, представленная методология обеспечивает точное позиционирование элементов поперечного армирования с учетом проектных требований и нормативных предписаний.



**Рис. 6 – Создание геометрии хомутов**  
**Fig. 6 – Creating clamp geometry**

На следующем этапе проектирования осуществляется генерация геометрической модели продольного армирования, детальное представление которой представлено на рис. 7. В качестве входных данных для данного процесса используются следующие параметры:

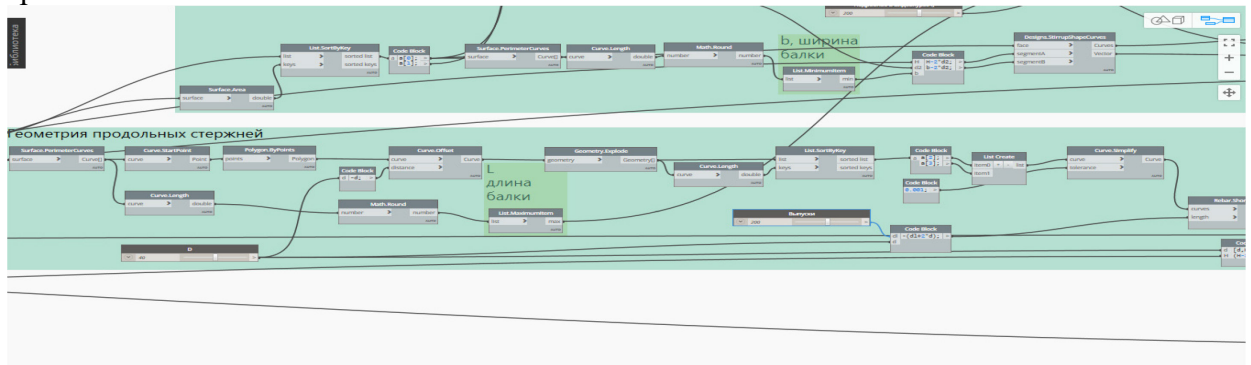
1. Геометрическая модель конструктивного элемента (балки).
2. Расчетная длина анкеровки арматурных стержней.

В рамках данного этапа выполняется комплексная обработка указанных параметров с целью формирования пространственной конфигурации продольного армирования. Результатом данного процесса является создание объекта `Geometry.Translate`, который представляет собой совокупность геометрических примитивов, описывающих расположение продольных арматурных стержней в конструкции.

В сформированном объекте осуществляется точное позиционирование всех элементов продольного армирования, что обеспечивает:

1. Корректное размещение арматурных стержней в поперечном сечении балки.
2. Соблюдение расчетных длин анкеровки.
3. Соответствие проектной документации.

Таким образом, представленная методология обеспечивает точное моделирование продольного армирования с учетом всех конструктивных особенностей и расчетных требований.



**Рис.7 – Создание продольных стержней**  
**Fig. 7 – Creation of longitudinal rods**

В процессе синтеза арматурного каркаса осуществляется интеграция геометрических моделей продольных стержней и поперечных хомутов, формирующих комплексную пространственную структуру армирования. На данном этапе происходит консолидация ранее созданных геометрических примитивов в единую систему арматурного каркаса.

После формирования базовой геометрии арматурного каркаса производится настройка его конструктивных характеристик посредством специализированного дополнения `DynamoForRebar` и семейства `Rebar`. В рамках данного этапа осуществляется:

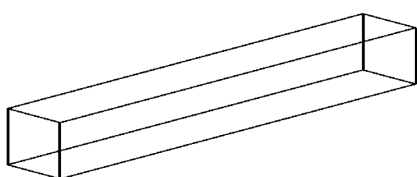
1. Селекция стиля армирования в соответствии с проектными требованиями.
2. Определение типоразмера арматурных элементов.

### 3. Спецификация методики анкеровки и конфигурации загиба арматурных стержней.

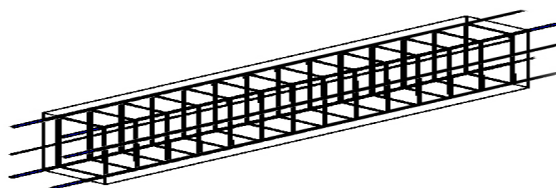
Конечная стадия алгоритма реализуется посредством Python.Script, который обеспечивает генерацию итогового арматурного каркаса с учетом всех заданных параметров и характеристик. Практическая реализация описанного алгоритма демонстрирует следующий порядок действий:

1. Создание базовой конструкции балки, показанной на рис.8, с заданными габаритными размерами (400x800 мм)
2. Идентификация конструктивного элемента посредством передачи его уникального идентификатора в скрипт
3. Запуск алгоритма обработки
4. Получение итогового результата (рис. 9).

Таким образом, представленная методология обеспечивает комплексную автоматизацию процесса проектирования арматурного каркаса балки с возможностью гибкой настройки конструктивных параметров и характеристик армирования.



**Рис. 8 – Начальный вид балки**  
**Fig. 8 – Initial view of the beam**



**Рис. 9 – Вид балки после работы скрипта**  
**Fig. 9 – View of the beam after running the script**

В рамках настоящего исследования представляется систематизированный перечень базовых нодальных элементов, задействованных при реализации алгоритмического скрипта, направленного на проектирование арматурного каркаса балки. Далее следует детальная классификация и функциональное описание ключевых нодов, которые были применены в процессе разработки программного обеспечения для автоматизации процесса армирования конструктивного элемента [8].

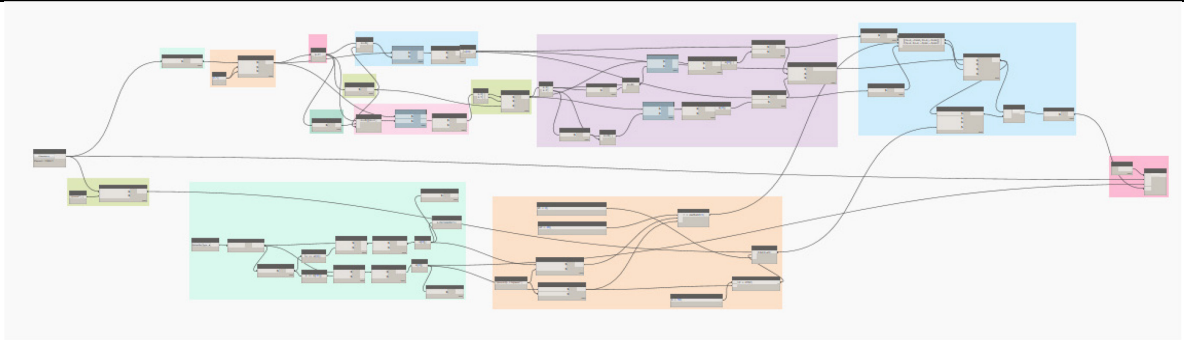
Представленные в табл. 1 ноды демонстрируют комплексный подход к решению задачи проектирования арматурного каркаса и отражают специфику взаимодействия различных компонентов программного обеспечения в рамках единой алгоритмической структуры.

**Таблица 1. Основные ноды использованные в скрипте армирования балки**  
**Table 1. Main nodes used in the beam reinforcement script**

|                                 |   |
|---------------------------------|---|
| Element.GetParameterValueByName | Получение параметров экземпляра по названию   |
| BoundingBox.Minpoint            | Получение нижней точки элемента   |
| Code Block                      | Нод позволяющий писать свой код на Python.  |
| List.FilterByBoolMask           | Он по очереди перебирает все элементы списка и каждый из них помещает либо в слот in, либо в слот out |
| Categories                      | С его помощью можно взять ту или иную категорию.  |

**Армирование колонн.** На рис. 10 демонстрируется целостная структура алгоритмического скрипта, предназначенного для автоматизации процесса проектирования арматурного каркаса колонны.

Инициализация данного программного модуля осуществляется посредством загрузки уникального идентификатора конструктивного элемента (колонны), что является первостепенным этапом в реализации комплексного алгоритма армирования. Данная методология позволяет обеспечить точное позиционирование арматурных элементов в пространстве с учетом индивидуальных характеристик конкретного конструктивного элемента, что является критически важным для обеспечения требуемой прочности и надежности проектируемой конструкции.



**Рис. 10 – Общий вид скрипта армирования колонн**  
**Fig. 10 – General view of the column reinforcement script**

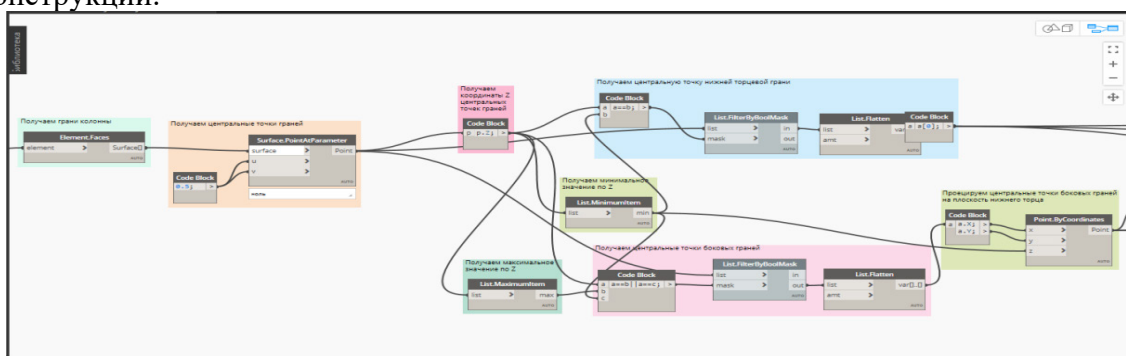
На начальном этапе проектирования осуществляется последовательное определение геометрических характеристик колонны посредством следующих операций:

1. Идентификация поверхностного массива колонны с использованием нода `Element.Faces`.
2. Определение центральных точек каждой грани через функционал `Surfaces.PointAtParameter`.
3. Селекция минимальных значений посредством `List.MinimumItem` для определения нижней торцевой грани.
4. Экстракция координат  $Z$  и определение центральной точки нижней торцевой грани.
5. Финальная обработка данных через `Code Block`, обеспечивающая вывод первого элемента сформированного списка.

Последующий этап характеризуется выполнением следующих процедур:

1. Определение центральных точек боковых граней колонны.
2. Выполнение операции проецирования указанных точек на плоскость нижнего торца конструкции.

Данная методология обеспечивает точное позиционирование ключевых точек арматурного каркаса с учетом пространственной конфигурации колонны, что является необходимым условием для корректного проектирования системы армирования. Представленный алгоритм, показанный на рис. 11 позволяет создать надежную основу для дальнейшего формирования арматурного каркаса, обеспечивая точное определение геометрических параметров и пространственного расположения арматурных элементов в конструкции.



**Рис. 11 – Начало скрипта. Получение опорных точек**  
**Fig. 11 – Start of the script. Obtaining reference points**

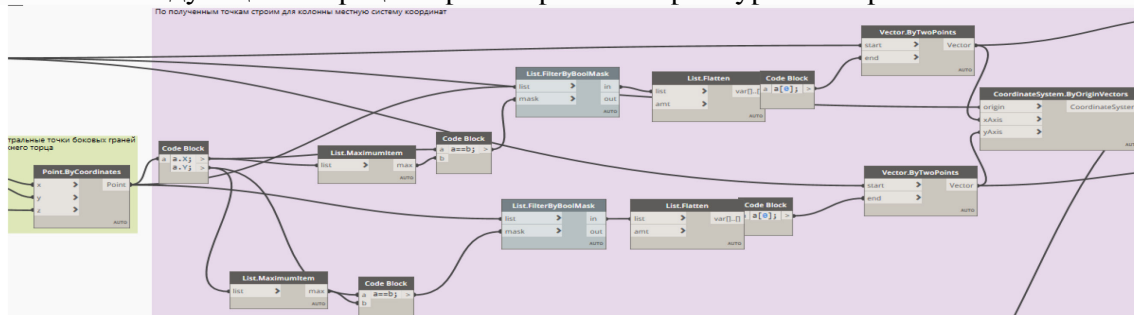
В целях оптимизации функционирования алгоритмического скрипта и обеспечения точности позиционирования арматурных элементов осуществляется построение локальной системы координат. Данный процесс реализуется посредством следующих последовательных операций: формирование двух базовых векторов с использованием нода `Vector.ByTwoPoints` на основе предварительно определенных точек; конструирование системы координат на основе полученных векторных элементов.

Представленный метод построения локальной системы координат позволяет:

1. Обеспечить корректное позиционирование арматурных элементов в пространстве.
2. Упростить алгоритмическую обработку геометрических параметров.
3. Повысить точность вычислений при проектировании арматурного каркаса.

Детальное описание процесса создания локальной системы координат представлено на рис. 12, где наглядно демонстрируется последовательность операций и их взаимосвязь в рамках общего алгоритма проектирования.

Таким образом, построение локальной системы координат является критически важным этапом в алгоритме армирования, обеспечивающим необходимую точность и эффективность последующих операций проектирования арматурного каркаса.



**Рис. 12 – Построение местной системы координат**  
**Fig. 12 – Construction of a local coordinate system**

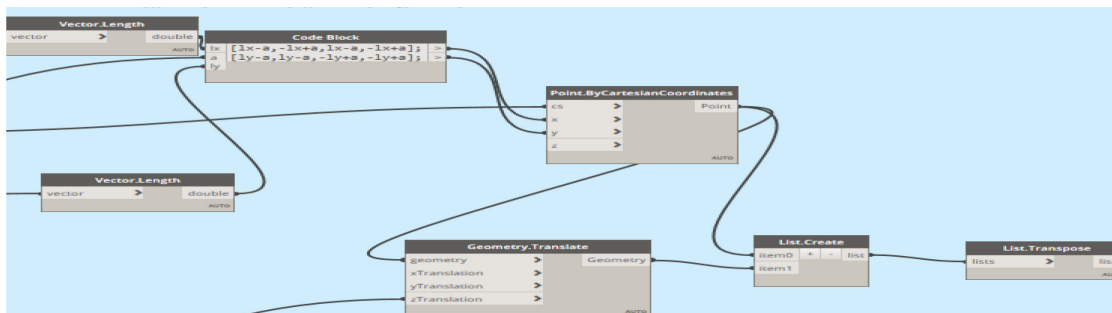
В рамках установленной локальной системы координат осуществляется процесс позиционирования точек размещения продольных арматурных стержней. Данная операция реализуется посредством комплексной интеграции следующих нодальных групп:

1. Vector - обеспечивает векторное моделирование и определение пространственного положения элементов.
2. Code Block - предоставляет возможности для программируемой обработки данных и реализации пользовательских алгоритмов.
3. List - осуществляет управление списками и массивами данных, необходимых для корректного позиционирования арматурных элементов.

На завершающем этапе данного процесса происходит формирование структурированного списка арматурных стержней посредством нода List.Create, который обеспечивает:

1. Систематизацию данных о пространственном расположении арматурных элементов.
2. Создание упорядоченной последовательности для последующей обработки.
3. Формирование базы данных для конструирования арматурного каркаса.

Представленный подход, продемонстрированный на рис.13 к позиционированию арматурных стержней позволяет обеспечить точное и систематическое размещение элементов армирования в соответствии с проектными требованиями и конструктивными особенностями колонны.



**Рис. 13 – Построение точек стержней**  
**Fig. 13 – Construction of rod points**

В рамках реализации алгоритма проектирования арматурного каркаса осуществляется следующая последовательность операций:

1. Идентификация типов арматурных стержней производится посредством нода Element.Name (рис. 14), который обеспечивает: категоризацию арматурных элементов по их характеристикам; формирование структурированного перечня доступных типов арматуры.
2. Селекция необходимого типа арматурного стержня осуществляется через специализированное окно кода (рис. 15), что позволяет: обеспечить точный выбор требуемого типа арматуры; учесть специфические параметры конкретного конструктивного элемента.
3. На этапе параметризации арматурного каркаса производится: определение размеров выпусков арматурных стержней; расчет оптимальных расстояний между продольными стержнями; формирование геометрических параметров установки арматурных элементов.
4. Финальная стадия проектирования (рис. 16) характеризуется: интеграцией всех предварительно полученных данных в блок создания арматуры; автоматизированной генерацией арматурных стержней; формированием окончательного арматурного каркаса в соответствии с проектными требованиями.

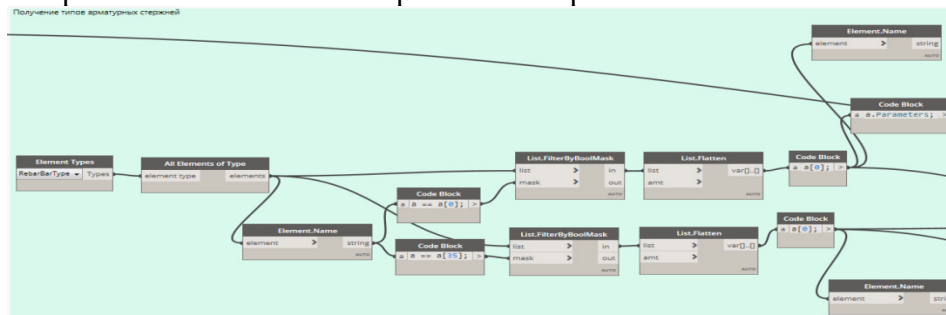


Рис. 14 – Получение типа арматуры  
 Fig. 14 – Obtaining the reinforcement type

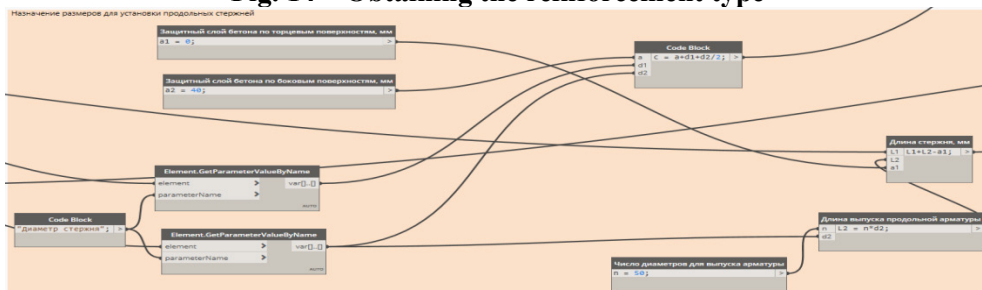


Рис.15 – Назначение размеров для установки продольных стержней  
 Fig. 15 – Assigning dimensions for installing longitudinal rods

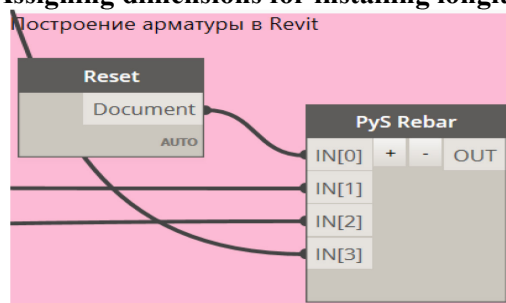


Рис.16 – Построение арматуры  
 Fig. 16 – Construction of reinforcement

Представленный алгоритм обеспечивает комплексную автоматизацию процесса проектирования арматурного каркаса, начиная от идентификации типов арматуры и заканчивая формированием окончательного конструктивного решения, показанного на рис. 17, 18.

В рамках практической верификации разработанного алгоритмического решения осуществляется следующая последовательность действий:

1. Формирование базовой конструктивной модели (рис. 17): создание колонны с заданными габаритными размерами 400x400 миллиметров; определение пространственного положения элемента в проектной модели.
2. Инициализация алгоритмического модуля (рис. 18): запуск программного скрипта для автоматизации процесса проектирования арматурного каркаса; активация последовательности вычислительных операций в соответствии с заданным алгоритмом.
3. Представленный метод практической реализации позволяет: проверить корректность функционирования разработанного алгоритма; оценить эффективность автоматизированного подхода к проектированию арматурного каркаса; подтвердить соответствие получаемых результатов проектным требованиям.

Таким образом, данный этап работы является критически важным для верификации работоспособности алгоритмического решения и его практической применимости в процессе проектирования железобетонных конструкций.



Рис. 17 – Начальный вид  
 Fig. 17 – Initial view

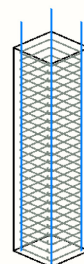


Рис. 18 – Армированная колонна  
 Fig. 18 – Reinforced column

Систематизированный перечень ключевых узлов, задействованных в алгоритмическом скрипте проектирования арматурного каркаса колонны представлен в табл. 2.

Таблица 2. Основные узлы использованные в скрипте армирования колонны  
 Table 2. Main nodes used in the column reinforcement script

|                                 |   |
|---------------------------------|---|
| Element.Name                    | Получение названия элемента из списка.  |
| List.Create                     | Создание нового списка. На вход получаем элементы для заполнения списка.                            |
| Vector.ByTwoPoints              | Создание вектора по двум точкам   |
| List.MinimumItem                | Нахождение минимального элемента в списке.  |
| Element.GetJoinedElements       | Получение объединенных элементов, для их выбора.  |
| List.Flatten                    | Удаляет уровни данных из структуры данных. Используется, когда иерархии данных не нужны для работы. |
| Element.GetParameterNameByValue | Получение имени параметра по значению.  |

**Армирование плит перекрытий.** На рис. 19 представлено систематизированное графическое отображение комплексной алгоритмической структуры, обеспечивающее всестороннее понимание принципов функционирования программного скрипта.

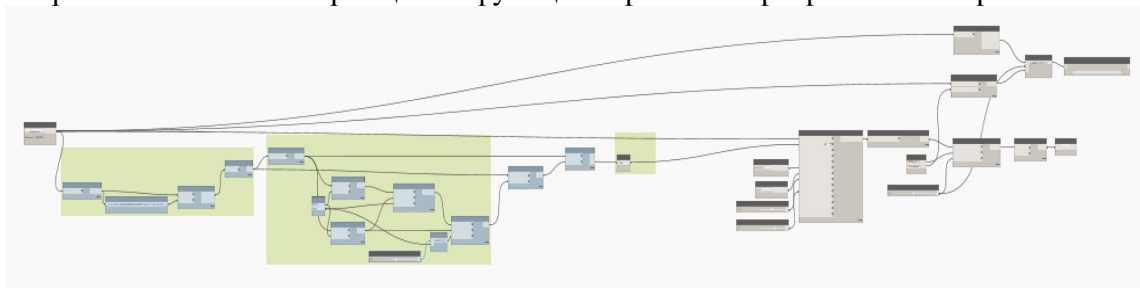


Рис. 19 – Общий вид скрипта  
 Fig. 19 – General view of the script

В процессе алгоритмической обработки конструктивного элемента осуществляется последовательная реализация ряда операций. Инициализация процесса проектирования начинается с импортирования идентификатора конструктивного элемента (плиты

перекрытия) в рабочую среду, после чего элемент передается в нод Element.Faces для получения его геометрических характеристик. Далее происходит определение пространственных параметров, включающее идентификацию всех граней элемента и локализацию верхней грани перекрытия как ключевого конструктивного элемента.

После этого выполняется сортировка и фильтрация данных посредством применения нода Code Block для программируемой обработки информации и использования List.SortByKey для структурирования данных по определенным критериям. В результате происходит выделение верхней грани перекрытия посредством List.LastItem как конечного элемента отсортированного списка.

Представленный алгоритм обеспечивает точную идентификацию конструктивного элемента, корректное определение его пространственного положения, систематизацию геометрических характеристик и формирование структурированной базы данных для последующего проектирования арматурного каркаса.

Таким образом, описанная последовательность операций позволяет создать надежную основу, показанную на рис. 20, для дальнейшего моделирования арматурного каркаса перекрытия с учетом его конструктивных особенностей и пространственной ориентации.

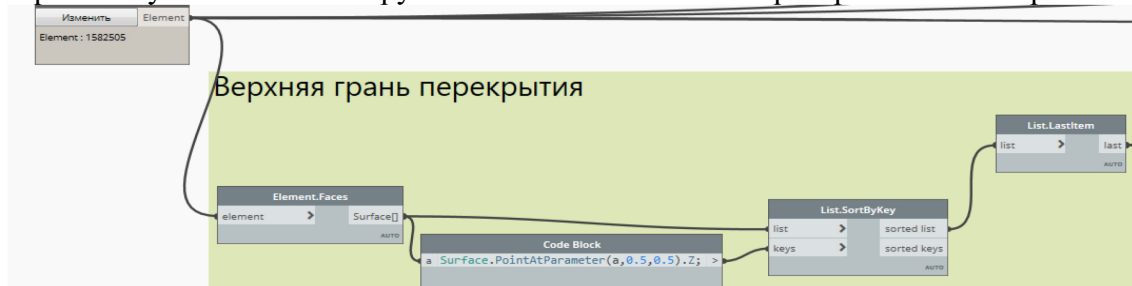


Рис. 20 – Верхняя грань перекрытия  
Fig. 20 – Upper edge of the ceiling

В процессе алгоритмической обработки осуществляется генерация лучевых элементов посредством интеграции нодальных групп Curve и Geometry. Результатом данной операции является формирование нода Line.ByStartPointDirectionLength, который обеспечивает создание линейных элементов с заданными параметрами начальной точки, направления и длины. Визуализация данной алгоритмической последовательности представлена на иллюстративном материале под номером 21, где наглядно демонстрируется процесс генерации лучевых элементов и их параметрическая настройка.

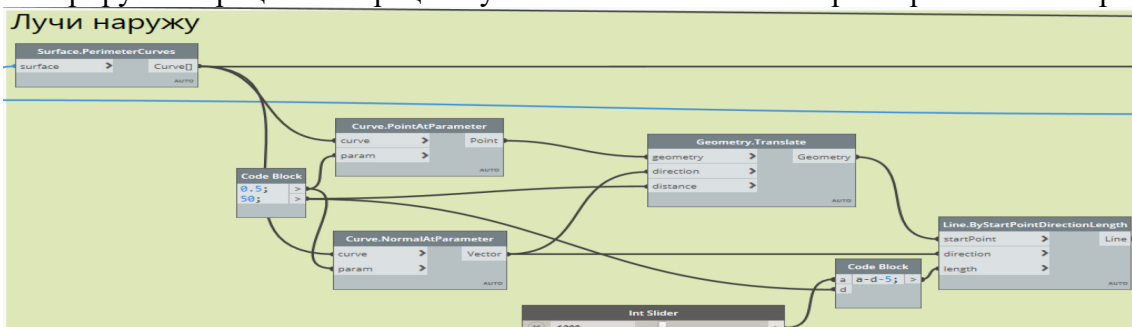


Рис. 21 – Нахождение лучей  
Fig. 21 – Finding the rays

В рамках реализации алгоритма проектирования осуществляется генерация геометрической модели арматурного каркаса. Данный процесс предусматривает последовательное выполнение следующих операций:

1. Формирование геометрического описания арматурного каркаса с учетом конструктивных особенностей проектируемого элемента.
2. Имплементация параметров арматурных элементов посредством специализированного программного пакета DynamoForRebar, включающая: определение

типологических характеристик арматурных стержней; спецификацию методов их гибки и формовки; установление геометрических параметров арматурного каркаса.

### 3. Генерация трехмерной модели арматурных стержней в соответствии с заданными параметрами и конструктивными требованиями.

Визуализация процесса создания арматурного каркаса представлена на рис. 22, где демонстрируется последовательность операций по формированию геометрической модели арматурного каркаса и генерации арматурных элементов.

Таким образом, описанная алгоритмическая последовательность обеспечивает комплексную реализацию процесса проектирования арматурного каркаса с учетом всех необходимых конструктивных и технологических параметров.

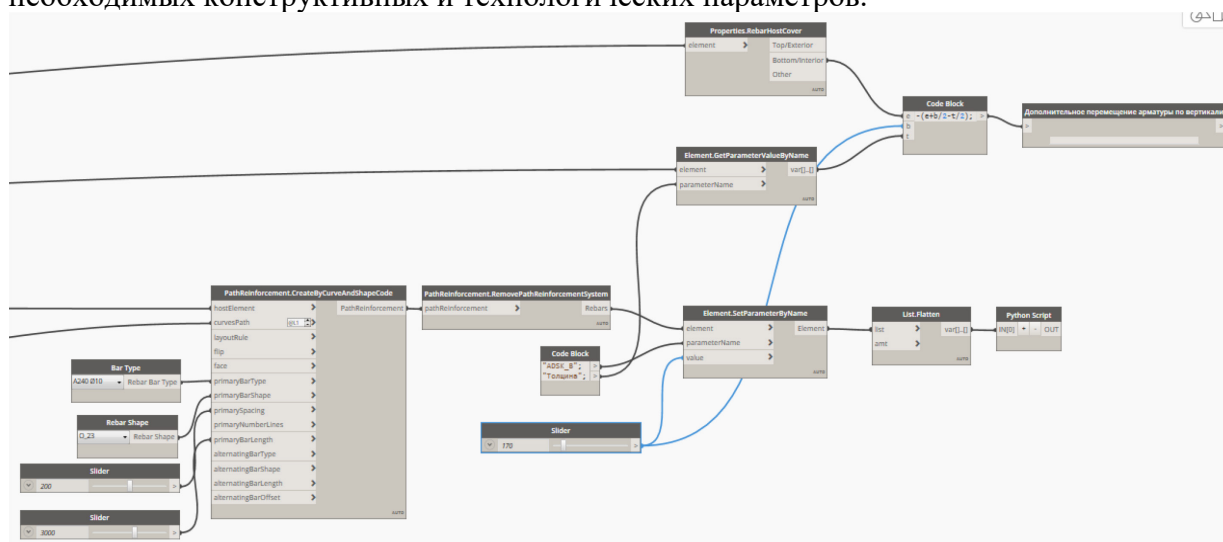


Рис. 22 – Создание стержней  
 Fig. 22 – Creating rods

Функционирование программного алгоритма осуществляется посредством последовательности операций.

В первую очередь производится инициализация конструктивного элемента - создание базового объекта перекрытия в рабочей среде проектирования. После этого активируется программный скрипт, отвечающий за процесс армирования. На этапе параметрической настройки осуществляется спецификация характеристик армирования и селекция типологических параметров арматурных стержней в соответствии с проектными требованиями.

По завершении конфигурации параметров производится повторный запуск скрипта, инициирующий процесс генерации арматурного каркаса. Результатом успешной реализации алгоритма является формирование комплексного конструктивного элемента - армированного перекрытия, соответствующего заданным проектным характеристикам и нормативным требованиям.

Визуализация конечного результата представлена на рис. 23-24, где демонстрируется итоговый конструктивный элемент с интегрированным арматурным каркасом.

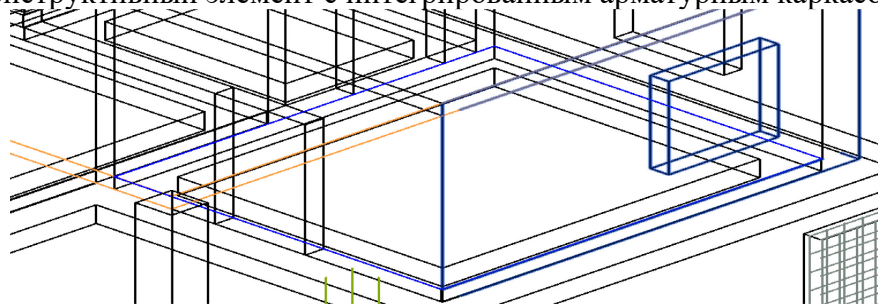
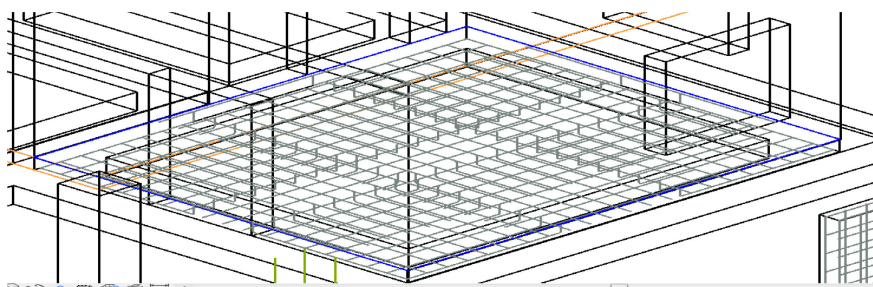


Рис. 23 – Начальный вид перекрытия  
 Fig. 23 – Initial view of the ceiling



**Рис. 24 – Армированное перекрытие**  
**Fig. 24 – Reinforced floor**

Таким образом, описанная последовательность операций обеспечивает полную реализацию алгоритма проектирования армированного перекрытия с возможностью адаптации под различные проектные требования и конструктивные решения.

Систематизированный перечень ключевых узлов, задействованных в алгоритмическом скрипте проектирования арматурного каркаса перекрытия представлен в табл. 3.

**Таблица 3. Основные узлы, использованные в скрипте армирования перекрытия**  
**Table 3. Main nodes used in the floor reinforcement script**

|                         |   |
|-------------------------|---|
| Element.Faces           | Получение граней элемента   |
| List.SortByKey          | Сортировка списка по ключу. На выходе получаем отсортированный список |
| List.LastItem           | Возвращает последний элемент списка                                   |
| Integer Slider          | Ползунок для ввода целочисленной переменной                           |
| Curve.NormalAtParameter | Получение внешнего контура грани                                      |

**Вывод.** В результате проведенного исследования были детально изучены и описаны алгоритмы автоматизированного проектирования систем армирования железобетонных конструкций в программном комплексе Revit-Dynamo. Разработанные методики позволяют эффективно создавать арматурные каркасы для балок, колонн и плит перекрытий с учетом их геометрических параметров, и конструктивных особенностей.

Практическая ценность работы подтверждается возможностью непосредственного применения описанных алгоритмов в проектной деятельности. Использование Dynamo для автоматизации процесса армирования существенно повышает производительность труда проектировщиков и обеспечивает высокое качество проектной документации.

Дальнейшее развитие темы может быть направлено на совершенствование существующих алгоритмов, расширение их функциональности и адаптацию под различные типы железобетонных конструкций. Полученные результаты могут служить основой для создания более сложных автоматизированных систем проектирования арматурных конструкций.

**Библиографический список:**

1. Т.А. Юрошева, А.В. Калиниченко, В.Г. Макиев. Алгоритм проектирования несущих конструкций многоэтажного здания с использованием среды визуального программирования DYNAMO STUDIO. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022; 49(4):126-133. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-4-126-133
2. Смакаев Р.М., Низина Т.А. Автоматизация задач проектирования с помощью среды визуального программирования DYNAMO STUDIO [Электронный ресурс] // Огарев-online. - 2020. - № 3.
3. Поддорогина Е.А., Шумилов К.А., Мазинг А.А. Разработка строительных объектов в DYNAMO REVIT // BIM-моделирование в задачах строительства и архитектуры: материалы Всерос. науч.-практ. конф., 29-30 марта 2018 г. – СПб: СПбГАСУ, 2018. – С. 177–182.
4. Калиниченко А.В., Аликов А.Ю., Юрошева Т.А. Разработка программного модуля автоматической коррекции чертежей, полученных в результате обмена графическими данными между САД-системами, на примере мебельного производства. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2024;51(4):80-86. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2024-51-4-80-86>
5. Официальный сайт поддержки продукта Dynamo Studio [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.dynamoprimer.com/index.html>

6. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция. СНиП 52-01-2003 / Минрегион России. М., 2012.
7. Юрошева Т.А., Калининченко А.В. Разработка программного модуля для автоматизации процесса расчёта водопотребления и водоотведения с использованием среды разработки DYNAMO STUDIO. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025;52(1):173-182. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2025-52-1-173-182>
8. Агаханов Э.К., Агаханов М.К., Труфанова Е.В., Джабраилов А.З. Моделирование каркаса уникального здания параметрической архитектуры на основе применения поверхности «цилиндр-цилиндр». Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025;52(1):193-201. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2025-52-1-193-201>

#### References:

1. T.A. Yurosheva, A.V. Kalinichenko, V.G. Makiev. An algorithm for designing load-bearing structures of a multi-storey building using the DYNAMO STUDIO visual programming environment. Bulletin of the Dagestan State Technical University. Technical sciences.
2. Smakaev R.M., Nizina T.A. Automation of design tasks using DYNAMO STUDIO visual programming [Electronic resource] // Ogarev-online. - 2020. - No. 3.
3. Poddorogina E.A., Shumilov K.A., Mazing A.A. Development of construction objects in DYNAMO REVIT // BIM-modeling in construction tasks and architecture: materials of All-Russian Scientific and Practical Conference, March 29-30, 2018 - St. Petersburg: SPbGA-SU, 2018. – P. 177-182.
4. Kalinichenko A.V., Alikov A.Yu., Yurosheva T.A. Development of a software module for automatic correction of drawings obtained as a result of graphic data exchange between CAD systems, using the example of machine manufacturing. Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences. 2024;51(4):80-86. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2024-51-4-80-86>
5. Official website of Dynamo Studio product support [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.dynamoprimer.com/index.html>
6. SP 63.13330.2018. Concrete and reinforced concrete structures. The main provisions. Updated version. SNiP 52-01-2003 / Ministry of Regional Development of Russia. Moscow, 2012.
7. Yurosheva T.A., Kalinichenko A.V. Development of a software module for automating the process of calculating water consumption and water disposal using the DYNAMO STUDIO development environment. Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences. 2025;52(1):173-182. (In Russ) <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2025-52-1-173-182>
8. Agakhanov E.K., Agakhanov M.K., Trufanova E.V., Dzhabraiлов A.Z. Modeling the frame of a unique building of parametric architecture based on the application of the "cylinder-cylinder" surface. Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences. 2025;52(1):193-201. (In Russ) <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2025-52-1-193-201>

#### Сведения об авторах:

Татьяна Александровна Юрошева, кандидат технических наук, доцент; кафедра «Информационных технологий и систем»; [trini-83@yandex.ru](mailto:trini-83@yandex.ru); ORCID: 0009-0002-1365-8787

Исупов Никита Сергеевич, аспирант, Институт строительства и архитектуры; [isupovn98@gmail.com](mailto:isupovn98@gmail.com); ORCID: 0000-0002-4301-3202

Кудзиев Шота Русланович, магистр, [kudziev.mega.ru@mail.ru](mailto:kudziev.mega.ru@mail.ru);

Акоева Евгения Николаевна, старший преподаватель, кафедра «Информационных технологий и систем»; [evgeniya-akoeva@mail.ru](mailto:evgeniya-akoeva@mail.ru)

#### Information about the authors:

Tatyana A. Yurosheva, Cand.Sci.(Eng.), Assoc. Prof.; Department of Information Technologies and Systems; [trini-83@yandex.ru](mailto:trini-83@yandex.ru); ORCID: 0009-0002-1365-8787

Isupov Nikita Sergeevich, Postgraduate student, Institute of Construction and Architecture; [isupovn98@gmail.com](mailto:isupovn98@gmail.com); ORCID: 0000-0002-4301-3202

Kudziev Shota Ruslanovich, Master,

Акоева Evgeniya Nikolaevna, Senior lecturer, Department of Information Technologies and Systems; [evgeniya-akoeva@mail.ru](mailto:evgeniya-akoeva@mail.ru)

#### Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 02.05.2025.

Одобрена после рецензирования/Revised 04.07.2025.

Принята в печать/ Accepted for publication 15.07.2025.

**Метод сбалансированного распределения нагрузки на серверы информационных систем органов внутренних дел Российской Федерации**

**А.И. Янгиров<sup>1</sup>, Е.А. Рогозин<sup>2</sup>, П.М. Дуплякин<sup>2</sup>, А.О. Ефимов<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> ФКУ «НИЦ «Охрана» Росгвардии,

<sup>1</sup> 111539, г. Москва, Реутовская, 12Б, Россия,

<sup>2</sup> Воронежский институт МВД России,

<sup>2</sup>394065, г. Воронеж, проспект Патриотов, 53, Россия

**Резюме. Цель.** В статье предложен метод распределения нагрузки на серверы информационных систем органов внутренних дел Российской Федерации. **Метод.** Исследование методологически базируется на анализе функционирования информационно-серверной инфраструктуры, а также опубликованных научных работ по тематике распределения нагрузки на серверную составляющую информационных систем. **Результат.** Рассмотрены основные алгоритмы и методы. Представлена модель балансировки нагрузки между серверами. Предложен метод сбалансированного распределения нагрузки на серверы информационных систем органов внутренних дел Российской Федерации; приведены результаты моделирования применения предлагаемого решения. **Вывод.** Метод может быть использован для повышения надежности и устойчивости функционирования информационных систем. Отмечается перспективность исследований по направлению распределения нагрузки на серверную составляющую информационных систем.

**Ключевые слова:** информационная система, серверы, распределение нагрузки, устойчивость функционирования, распределение вычислительных ресурсов

**Для цитирования:** А.И. Янгиров, Е.А. Рогозин, П.М. Дуплякин, А.О. Ефимов. Метод сбалансированного распределения нагрузки на серверы информационных систем органов внутренних дел Российской Федерации. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025;52(4):181-187. DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-4-181-187

**Method of balanced load distribution on servers of information systems of the internal affairs agencies of the Russian Federation**

**A.I. Yangirov<sup>1</sup>, E.A. Rogozin<sup>2</sup>, P.M. Duplyakin<sup>2</sup>, A.O. Efimov<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> FSI «SRC «OKHRANA» of the Federal service of National Guard of Russia,

<sup>1</sup>12B Reutovskaya Str., Moscow 111539, Russia,

<sup>2</sup>Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia,

<sup>2</sup>53 Patriots Ave., Voronezh 394065, Russia

**Abstract. Objective.** A method for distributing the load on servers of information systems of the internal affairs agencies of the Russian Federation is proposed. **Method.** The study is based on methods for analyzing the functioning of information server infrastructure, as well as scientific papers on the topic of load balancing on the server component of information systems. **Results.** The main algorithms and methods are discussed. A model for balancing loads between servers is presented. A method for balanced load distribution on servers of information systems of the internal affairs agencies of the Russian Federation is proposed; simulation results of the proposed solution are presented. **Conclusion.** The authors note the potential of research in the area of load distribution on the server component of information systems. The proposed method can be used to improve the reliability and sustainability of information systems.

**Keywords:** information system, servers, load, stability, distribution of computing resources

**For citation:** A.I. Yangirov, E.A. Rogozin, P.M. Duplyakin, A.O. Efimov. The method of balanced load distribution on the servers of information systems of the internal affairs bodies of the Russian Federation. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2025;52(4):181-187. DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-4-181-187

**Введение.** Современные информационные системы органов внутренних дел играют ключевую роль в обеспечении безопасности и правопорядка. Однако с увеличением объема обрабатываемых данных и ростом числа пользователей, к которым относятся как сотрудники правоохранительных органов, так и граждане, увеличивается и нагрузка на серверы этих систем. Повышенная нагрузка может привести к серьезным проблемам, которые угрожают не только эффективности работы, но и безопасности данных.

Одним из наиболее очевидных последствий перегрузки серверов является замедление работы систем. Время отклика на запросы возрастает, что усложняет доступ к необходимой информации. В критических ситуациях, когда оперативность реагирования имеет решающее значение, такие задержки могут значительно повлиять на своевременное исполнение задач. При высокой нагрузке серверы могут выйти из строя, что приведет к полной недоступности информационных систем. Это, в свою очередь, напрямую влияет на работу органов внутренних дел (например, возможность регистрировать заявления, проводить проверки баз данных и тому подобное). Перегрузка серверов может служить причиной сбоя в системе, что в свою очередь может привести к повреждению или полной потере важной информации. Сбои в информационных системах могут привести к несанкционированному доступу к личным данным, что может иметь серьезные правовые, этические и репутационные последствия для органов внутренних дел [1-3].

**Постановка задачи.** С учетом всех вышеперечисленных проблем становится очевидным, что для обеспечения надежности и эффективной работы информационных систем органов внутренних дел следует уделить внимание корректному распределению нагрузки на серверы. Распределение нагрузки между несколькими серверами увеличивает устойчивость системы к сбоям. Если один сервер выходит из строя, другие продолжают функционировать, что позволяет гарантировать непрерывность обработки данных. Эффективное распределение нагрузки позволяет оптимально использовать ресурсы всей системы, что снижает энергопотребление и увеличивает срок службы оборудования, а также уменьшает операционные затраты. Кроме того, для корректного распределения нагрузки существуют специальные алгоритмы, которые могли бы способствовать решению данной проблемы, а также эффективнее использовать информационные системы органов внутренних дел.

**Методы исследования.** Данное исследование основано на анализе проблематики работы информационных систем и серверной составляющей, а также различных источников научной литературы и публикаций.

**Обсуждение результатов.** Вопросы распределения нагрузки на серверы различных систем рассматривались в следующих исследованиях [4 - 6]. В современном мире информационные системы стали неотъемлемой частью различных сфер жизни - от государственного управления до коммерческих предприятий. Системы обрабатывают огромные объемы данных и предоставляют доступ к различным услугам миллионам пользователей. В условиях увеличения нагрузки на серверы может возникнуть множество проблем, которые затрудняют стабильную работу систем и ставят под угрозу их эффективность.

Основной причиной разработки специальных алгоритмов распределения нагрузки на серверы является то, что информационные системы часто испытывают резкие скачки в потоке запросов. Это может происходить в ходе пиковых нагрузок, когда большое количество пользователей одновременно пытается получить доступ к одной и той же услуге или ресурсу. Если не применять алгоритмы, способные эффективно управлять этой нагрузкой, определенные серверы могут полностью перегружаться, в то время как другие остаются недогруженными. Результатом таких дисбалансов становится не только снижение общей

производительности системы, но и рост времени отклика, что может негативно сказаться на пользовательском опыте. При использовании алгоритмов распределения нагрузки система становится более гибкой и адаптивной к изменениям в рабочей нагрузке. Эти алгоритмы позволяют сбалансировать запросы пользователей между несколькими серверами, что делает возможным равномерное распределение ресурсов и предотвращает перегрузку отдельных компонентов. Таким образом, даже при резком увеличении количества обращений к системе оставшаяся часть инфраструктуры продолжает работать стабильно и эффективно. Это, в свою очередь, способствует более быстрому реагированию на запросы, что критически важно, особенно в тех сферах, где временные задержки могут иметь серьезные последствия, например, в экстренных службах или финансовых учреждениях.

Кроме того, правильное распределение нагрузки становится значительным фактором в обеспечении безопасности информационной системы. Серверы, которые работают на пределе своих возможностей, подвержены сбоям и становятся уязвимыми к кибератакам. Если система перегружена, это может привести не только к простоям, но и к утечке конфиденциальной информации. Алгоритмы распределения нагрузки помогают минимизировать такие риски, так как снижается вероятность того, что какой-либо один сервер станет местом, которое может быть атаковано.

Не стоит также забывать о финансовых аспектах. Правильное распределение нагрузки снижает потребность в чрезмерном количестве оборудования. Вместо того чтобы постоянно наращивать мощность серверов для поддержки пиковых нагрузок, организации могут использовать существующие ресурсы более эффективно. Это оптимизирует затраты на инфраструктуру и позволяет избежать необходимости в частой замене устаревшего оборудования. Использование алгоритмов распределения нагрузки в информационных системах – это не просто техническая мера, а необходимость для обеспечения их эффективной и надежной работы. В условиях растущей сложности и объемности данных, а также увеличения числа пользователей такие алгоритмы становятся важным инструментом для достижения высокой производительности и оперативности, которые необходимы для полноценного функционирования современных информационных систем.

В соответствии с исследованиями, проведенными в рамках разработки методов и моделей повышения живучести информационных систем на основе оценки внешних воздействий, подходы к реализации которых изложены в публикации [7], современные модели информационных систем получили в последнее время широкое распространение в первую очередь благодаря наличию механизма параллельной обработки запросов при выполнении задач и возможности неограниченного наращивания вычислительных узлов, но их разработка является нетривиальной задачей. Проблемы связаны с построением информационных систем подразделяются на системные (настройки системы под конкретный набор задач и эффективное управление ею в режиме мультизадачности) и архитектурные (определение производительности вычислительных узлов, задержка при передаче данных, и тому подобное). Для их решения применяются методы балансировки нагрузки.

Для построения методологии балансировки нагрузки распределенной информационной системы модель информационной системы может быть разделена на два уровня иерархии: генератор запросов; центр управления.

Первый уровень работает как терминал, то есть, создает запросы и отправляет их на обработку, формирующие таким образом отдельные потоки. Второй уровень обрабатывает полученные от генератора запросы. Центр управления содержит в своей структуре, вычислитель, буфер запросов, которые накапливают необработанные запросы, и диспетчеры, состоящие из дополнительных центров управления. Дополнительные центры управления запускаются диспетчером с целью обработки запросов, находящихся в очереди в буфере. При минимальном трафике поступления запросов все вычисления осуществляются на уровне центра управления согласно порядку очереди их представления генератором запросов. Но с увеличением количества запросов вычислительная мощность

не позволяет обработать все запросы, в результате чего происходит накопление запросов в буфере (рис. 1).

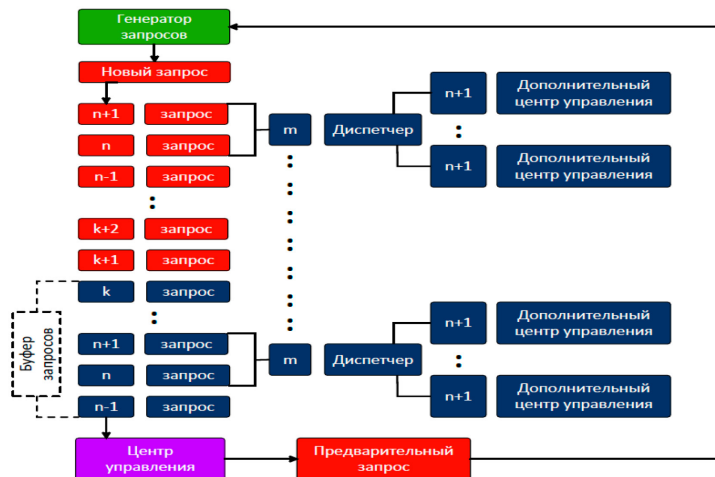


Рис. 1 – Схема с диспетчером балансировки нагрузки информационной системы  
 Fig. 1 – Design with load balancing manager information system

При достижении заданного количества запросов в буфере, центр управления запускает отдельные потоки диспетчеров, балансирующие нагрузку в системы. Диспетчер вычисляет количество дополнительных центров управления, необходимых для уменьшения количества запросов в буфере, при этом каждый дополнительный центр управления запускается в отдельном потоке. При балансировке нагрузки на аппаратные ресурсы серверов организации определяется распределение нагрузки между кластерами внутренней сети и распределение нагрузки в рамках отдельного кластера. При этом уровень нагрузки можно определить через коэффициент загрузки центральных процессоров серверов:

$$K_{ЦП} = \frac{n_{ц}n_{з}}{fk_{м}} + k_{ос} + k_{з} \quad (1)$$

- где:  $n_{ц}$  – количество циклов одной сессии;  
 $n_{з}$  – количество запросов;  
 $f$  – среднее значение тактовой частоты;  
 $k_{м}$  – коэффициент многоядерности;  
 $k_{ос}$  – коэффициент загрузки ОС;  
 $k_{з}$  – коэффициент загрузки (связан с дополнительными процессами на сервере, несвязанными с запросами).

Взаимосвязь коэффициентов, указанных в формуле 1, можно представить в следующем виде (рис. 2).

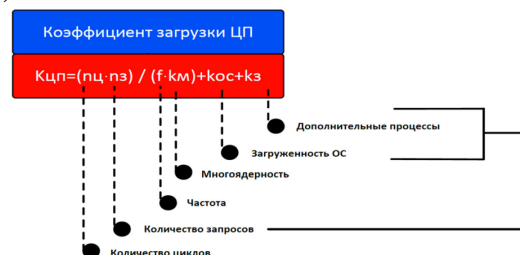


Рис. 2 – Визуализация взаимосвязи коэффициентов подхода к определению уровня нагрузки информационной системы

Fig. 2 – Visualization of the relationship between the coefficients of the approach to determining the load level of an information system

При балансировке нагрузки определяется пропорция распределения запросов между серверами, а также происходит динамическая корректировка данной пропорции при изменении условий работы системы. Для этого вводится понятие относительного рейтинга  $i$ -го сервера  $R_i$ , рассчитываемого на основе данных о количестве запросов, поступающих на  $i$ -ый сервер  $n_{з-i}$  и общем количестве запросов системы из  $k$  серверов  $\sum_{i=1}^k n_{з-i}$ :

$$R_i = \frac{n_{3-i}}{k_{\text{ЦП-}i} \sum_{i=1}^m n_{3-i}} \quad (2)$$

Уровень относительного рейтинга сервера системы с  $k$  серверов позволяет определить оптимальную судьбу запросов для отдельной рабочей платформы, таким образом, чтобы нагрузка для всех серверов была примерно одинаковой. На основании представленных исследований осуществим моделирование работы алгоритма балансировки нагрузки на примере разветвленной информационной сети, в состав которой входит три сервера:

- сервер № 1 - способен обработать 4000 запросов;
- сервер № 2 - способен обработать 7000 запросов;
- сервер № 3 - способен обработать 10500 запросов.

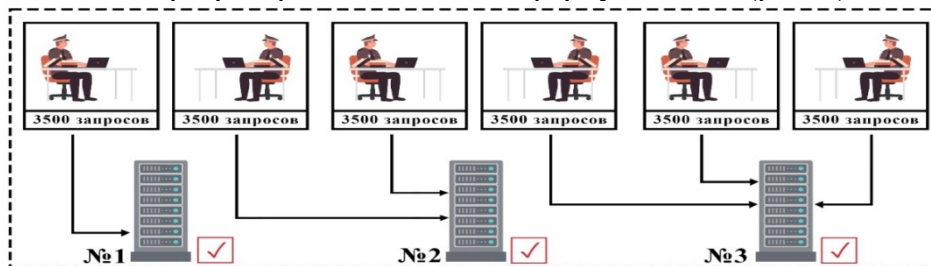
Без балансировки нагрузки общее количество запросов (21000) по серверам будет распределено равномерно (рис. 3), по 7000 запросов на один сервер.



**Рис. 3 – Схема работы распределенной информационной системы без балансировки нагрузки**

**Fig. 3 – Scheme of operation of a distributed information system without load balancing**

Исходя из рис. 3, сервер № 1 перегружен, сервер № 2 загружен оптимально, а сервер № 3 нагружен недостаточно. При использовании схемы по балансировке нагрузки (рис. 1) на сервер № 1 будет поступать 3500 запросов, на сервер № 2 – 7000 запросов, на сервер № 3 – 10500 запросов, в соответствии со значением относительного рейтинга каждого из серверов, рассчитанного по формулам 1 и 2 (рис. 4).



**Рис. 4 – Схема работы распределенной информационной системы с балансировкой нагрузки**

**Fig. 4 – Scheme of operation of a distributed information system with load balancing**

В предлагаемой схеме предусмотрен механизм автоматической балансировки информационной системы в случаях аварийной работы сети. При выходе из строя наиболее мощного сервера (сервер № 3) вычислительная мощность информационной системы снизится вдвое, но ресурсы будут распределены равномерно между серверами № 1 и № 2.



**Рис. 5 – Схема балансировки нагрузки при аварийной работе информационной системы**

**Fig. 5 – Emergency load balancing scheme information system**

В результате моделирования работы предлагаемой схемы балансировки наблюдаются положительные изменения в распределении запросов между серверами.

Без балансировки нагрузки (рис. 3) сервер № 1 перегружен, сервер № 2 загружен оптимально, а сервер № 3 недогружен, что приводит к неэффективному использованию ресурсов. С внедрением схемы балансировки нагрузки (рис. 4) запросы распределяются более рационально: сервер № 1 обрабатывает 3500 запросов, сервер № 2 – 7000 запросов, а сервер № 3 – 10500 запросов, что позволяет избежать перегрузки серверов, а также повысить общую эффективность системы. Кроме того, механизм автоматической балансировки в случае аварийной работы одного из серверов позволяет перераспределить нагрузку между оставшимися серверами, что гарантирует стабильную работу системы даже в условиях сбоев. В целом, предложенная модель балансировки нагрузки может повысить производительность и устойчивость информационной системы.

**Вывод.** Таким образом, предложенный алгоритм позволяет динамически определять пропорции распределения запросов для сохранения равномерной загрузки имеющихся аппаратных ресурсов. Подобные алгоритмы, распределяющие нагрузку, предотвращают перегрузку отдельных серверов, позволяя системе обрабатывать больше запросов и обеспечивая быстрый отклик. Внедрение алгоритмов распределения нагрузки требует первоначальных затрат, однако в долгосрочной перспективе это может значительно сократить расходы, препятствуя дорогостоящим простоям и обеспечивая сохранность данных. Кроме того, системы с распределением нагрузки легче развивать. При необходимости добавление новых серверов позволяет обеспечить пропорциональное увеличение мощности системы.

Предлагаемый подход и представленное в статье направление исследований перспективны и при достаточной проработке могут применяться для информационных систем органов внутренних дел Российской Федерации.

Внедрение и эффективное использование алгоритмов распределения нагрузки представляют собой стратегически важный шаг для обеспечения устойчивости и надежности информационных систем. Эти технологии не только способствуют повышению производительности и безопасности, но и позволяют оптимизировать затраты и ресурсы. В эпоху цифровизации, когда информационные системы становятся все более сложными и многогранными, их успешное функционирование напрямую зависит от способности адаптироваться к быстро меняющимся условиям. Поэтому исследования алгоритмов, обеспечивающих равномерное распределение нагрузки, является необходимым шагом на пути к эффективному управлению цифровыми процессами в любой организации. Это создает не только более гибкие и эффективные системы, но и улучшает общий пользовательский опыт, обеспечивая доступность и скорость выполняемой работы пользователями.

#### **Библиографический список:**

1. Анализ особенностей функционирования защищенных автоматизированных систем органов внутренних дел в условиях воздействия угроз несанкционированного доступа / А.О. Ефимов, В.С. Наседкина, А.Д. Попов, Е.А. Рогозин, В.Р. Романова // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2023. – Т. 50, № 1. – С. 81-88. – DOI 10.21822/2073-6185-2023-50-1-81-88. – EDN WRBRHY.
2. Анализ и особенности функционирования защищенных автоматизированных систем органов внутренних дел в условиях воздействия угроз несанкционированного доступа / В.Р. Романова, Е.А. Рогозин, А.О. Ефимов // Вопросы обеспечения безопасности в киберпространстве: Материалы Всероссийской научно-технической конференции, Махачкала, 16 декабря 2022 года. – Махачкала: Дагестанский государственный технический университет, 2022. – С. 224-230. – EDN VJUTOO.
3. Анализ существующих угроз внешнего нарушителя к информационному ресурсу веб-серверов в автоматизированных системах органов внутренних дел Российской Федерации / В.Р. Романова, Е.А. Рогозин // Охрана, безопасность, связь. – 2023. – № 8-3. – С. 62-69. – EDN DSQRQW.
4. Алгоритм балансировки нагрузки центра обработки данных на основе нелинейной прогнозной модели / В.П. Мочалов, Н.Ю. Братченко, Д.В. Гостева // Современные наукоемкие технологии. – 2024. – № 3. – С. 62-68. – DOI 10.17513/snt.39947. – EDN JHDSZ.

5. Методы балансировки нагрузки в информационных системах / Е.Д. Архипцев, Н.С. Мокрецов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2024. – Т. 67, № 4. – С. 345-351. – DOI 10.17586/0021-3454-2024-67-4-345-351. – EDN IWWVUW.
6. Автоматизация процесса распределения нагрузки между серверами приложений/Б.В. Дорош// Фундаментальные и прикладные исследования молодых учёных: Сборник материалов VIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, приуроченной к празднованию 300-летия Российской академии наук, Омск, 25–26 апреля 2024 года. – Омск: Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), 2024. – С. 501-505. – EDN HASWDG.
7. Современные направления защиты центра обработки данных от кибератак / Я.В. Шестак, Д. Огбу, А.Г. Оксюк // Journal of Advanced Research in Technical Science. – 2017. – № 4. – С. 59-61. – EDN YHGDLN.

#### References:

1. Analysis of the features of the functioning of protected automated systems of internal affairs bodies under the influence of threats of unauthorized access / A.O. Efimov, V.S. Nasedkina, A.D. Popov, E.A. Rogozin, V.R. Romanova. *Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences*. 2023;50(1): 81-88. – DOI 10.21822/2073-6185-2023-50-1-81-88. – EDN WRBRHY. (In Russ)
2. Analysis and features of the functioning of secure automated systems of internal affairs bodies under the influence of threats of unauthorized access. V.R. Romanova, E.A. Rogozin, A.O. Efimov. *Issues of ensuring security in cyberspace: Materials of the All-Russian Scientific and Technical Conference*, Makhachkala, December 16, 2022. – Makhachkala: Dagestan State Technical University, 2022;224-230. (In Russ)
3. Analysis of existing threats from an external intruder to the information resource of web servers in automated systems of internal affairs bodies of the Russian Federation / V. R. Romanova, E. A. Rogozin. *Security, safety, communications*. 2023;8(3):62-69. – EDN DSQRQW. (In Russ)
4. Algorithm for balancing the load of a data processing center based on a nonlinear predictive model / V.P. Mochalov, N.Yu. Bratchenko, D.V. Gosteva. *Modern High technology*. 2024;3:62-68. – DOI 10.17513/snt.39947. – EDN JHDSZ. (In Russ)
5. Methods of load balancing in information systems / E.D. Arkhiptsev, N.S. Mokretsov. *News of higher educational institutions. Instrumentation*. 2024;67(4):345-351. – DOI 10.17586/0021-3454-2024-67-4-345-351. – EDN IWWVUW. (In Russ)
6. Automation of the process of load distribution between application servers / B.V. Dorosh. Fundamental and applied research of young scientists: Collection of materials of the VIII International scientific and practical conference of students, graduate students and young scientists, dedicated to the celebration of the 300th anniversary of the Russian Academy of Sciences, Omsk, April 25–26, 2024. – Omsk: Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), 2024: 501-505. – EDN HASWDG. (In Russ)
7. Modern trends in protecting a data center from cyber attacks / Y.V. Shestak, D. Ogbu, A.G. Oksiyuk. *Journal of Advanced Research in Technical Science*. 2017;4:59-61. – EDN YHGDLN. (In Russ)

#### Сведения об авторах:

Адил Илдарович Янгиров, начальник отделения лабораторных исследований и испытаний; [adil-yan@yandex.ru](mailto:adil-yan@yandex.ru)

Евгений Алексеевич Рогозин, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры автоматизированных информационных систем ОВД; [evgenirogozin@yandex.ru](mailto:evgenirogozin@yandex.ru)

Дуплякин Петр Михайлович, преподаватель кафедры радиотехнических систем и комплексов охранного мониторинга; [00008540@mail.ru](mailto:00008540@mail.ru)

Алексей Олегович Ефимов, преподаватель кафедры автоматизированных информационных систем ОВД; [ea.aleksei@yandex.ru](mailto:ea.aleksei@yandex.ru)

#### Information about authors:

Adil I. Yangirov, Head of the Laboratory Research and Testing; [adil-yan@yandex.ru](mailto: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](mailto:evgenirogozin@yandex.ru)

Piotr M. Duplyakin, Lecturer at the Department of Radio Engineering Systems and Security Monitoring Complexes; [00008540@mail.ru](mailto:00008540@mail.ru)

Aleksey O. Efimov, Lecturer, Department of Automated Information Systems of Internal Affairs Bodies; [ea.aleksei@yandex.ru](mailto:ea.aleksei@yandex.ru)

#### Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 20.05.2025.

Одобрена после рецензирования/Revised 29.06.2025.

Принята в печать /Accepted for publication 26.07.2025.

**Использование параметрической поверхности диагонального переноса при проектировании большепролетного выставочного павильона**

**Э.К. Агаханов<sup>1</sup>, М.К. Агаханов<sup>2</sup>, Е.В. Труфанова<sup>3</sup>, Г.М. Муртазалиев<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Дагестанский государственный технический университет,

<sup>1</sup>367015, г. Махачкала, пр. Имама Шамиля, 70, Россия,

<sup>2</sup> Московский государственный строительный университет,

<sup>2</sup>129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26, Россия,

<sup>3</sup> Донской государственный технический университет,

<sup>3</sup>344002, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1, Россия

**Резюме. Цель.** Целью исследования является моделирование и расчет каркаса здания большепролетного выставочного павильона, созданного с использованием поверхности диагонального переноса, на особые сейсмические воздействия по нормативному методу с учетом эксплуатационных статических и динамических воздействий, а также регулирование усилий и перемещений в элементах каркаса здания способом изменения геометрической схемы. **Метод.** Каркас уникального здания разработан на основе изучения эволюции поверхности диагонального переноса в программных комплексах ArchiCAD, САПФИР и Лира-САПР. **Результат.** На первом этапе проектирования производился численный эксперимент по регулированию напряженно-деформированного состояния каркаса здания. Выполнен расчет отдельных элементов здания для определения оптимальной расчетной схемы и предварительного подбора сечений элементов. Рассмотрено два варианта арок покрытия. Выполнено варьирование физико-механических и геометрических параметров несущих конструкций. По результатам численного эксперимента выбрана окончательная расчетная схема здания и выполнен полный динамический расчет каркаса с учетом сейсмического воздействия. **Вывод.** Получены перемещения узлов конечно-элементной модели в глобальной системе координат, а также усилия в несущих элементах каркаса. Выполнен дополнительный расчет на устойчивость арочного покрытия. По результатам анализа полученных данных выбран рациональный вариант конструирования каркаса здания.

**Ключевые слова:** информационное моделирование, параметрическая архитектура, формообразование, численный эксперимент, регулирование напряженно-деформированного состояния, метод конечных элементов

**Для цитирования:** Э.К. Агаханов, М.К. Агаханов, Е.В. Труфанова, Г.М. Муртазалиев. Использование параметрической поверхности диагонального переноса при проектировании большепролетного выставочного павильона. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025;52(4):188-195. DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-4-188-195

**Using a parametric diagonal transfer surface in the design of a large-span exhibition pavilion**

**E.K. Agakhanov<sup>1</sup>, M.K. Agakhanov<sup>2</sup>, E.V. Trufanova<sup>3</sup>, G.M. Murtazaliev<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Daghestan State Technical University,

<sup>1</sup>70 I. Shamilya Ave., Makhachkala 367015, Russia,

<sup>2</sup>Moscow State University of Civil Engineering (National Research University MGSU),

<sup>2</sup>26 Yaroslavskoe highway, Moscow129337, Russia,

<sup>3</sup>Don State Technical University,

<sup>3</sup>1 Gagarin Square, Rostov-on-Don 344000, Russia

**Abstract. Objective.** Modeling and calculation of the building frame of a large-span exhibition pavilion, created using a diagonal transfer surface, for special seismic impacts using a standard method taking into account operational static and dynamic impacts, as well as regulation of forces and displacements in the elements of the building frame by changing the geometric scheme. **Method.** The framework of the unique building was developed based on the study of the evolution of the diagonal transfer surface in the ArchiCAD, SAPFIR and Lira-SAPR software packages. **Result.** At the first stage of design, a numerical experiment was conducted to regulate the stress-strain state of the building frame. The calculation of individual elements of the building was performed to determine the optimal calculation scheme and preliminary selection of element sections. Two options for roof arches were considered. The physical, mechanical and geometric parameters of the supporting structures were varied. Based on the results of the numerical experiment, the final calculation scheme of the building was selected and a full dynamic calculation of the frame was performed taking into account seismic impact. **Conclusion.** The displacements of the finite element model nodes in the global coordinate system, as well as the forces in the supporting elements of the frame, were obtained. An additional calculation for the stability of the arched roof was performed. Based on the analysis of the data obtained, a rational option for constructing the building frame was selected.

**Keywords:** information modeling, parametric architecture, forming, numerical experiment, regulation of the stress-strain state, finite element method

**For citation:** E.K. Agakhanov, M.K. Agakhanov, E.V. Trufanova, G.M. Murtazaliev. The use of a parametric diagonal transfer surface in the design of a large-span exhibition pavilion. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2025;52(4):188-195. (In Russ) DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-4-188-195

**Введение.** Современные объекты строительства являются сложными многоэлементными системами, для которых зачастую необходимы многовариантные расчеты. В настоящее время являются актуальными задачи оптимального проектирования объектов строительства, регулирования усилий и перемещений в элементах конструкций на различных стадиях их работы, а также проектирования конструкций наименьшего объема. Особую сложность представляют расчеты с учетом динамических нагрузок.

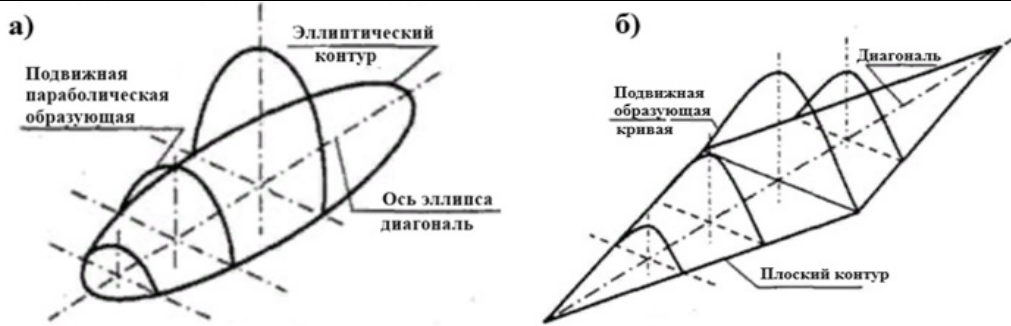
К динамическим расчетам относятся расчеты на сейсмические воздействия, которые характеризуются низкой предсказуемостью и высокой интенсивностью. Современные строительные нормы, как отечественные, так и зарубежные, предполагают учет особых, в том числе сейсмических, воздействий в комплексе с эксплуатационными нагрузками, что требует от проектировщика ответственного подхода к созданию расчетной модели сооружения.

**Постановка задачи.** В качестве конструктивного решения применены сводчатые арочные покрытия пролетом 30 метров с шагом арок 12 метров.

Поверхности диагонального переноса образуются по принципу переноса плоской кривой по направляющей так, что при скольжении образующей кривой по плоскому неподвижному контуру, две ее симметричные точки непрерывно его касаются. Такая поверхность может быть образована на контуре самопроизвольного очертания. Наибольший интерес представляют поверхности, образованные на контуре с симметрией (окружности, эллипсы, квадраты и прямоугольники) (рис.1).

Рассмотрена эволюция формообразования поверхности диагонального переноса для плоского ромбического контура. Поверхности диагонального переноса относятся к аналитическим поверхностям. Аналитическая поверхность – это абстрактное двумерное комплексное аналитическое многообразие, снабженное комплексной структурой.

Поверхность переноса может быть задана образующей линией в начальном положении и некоторой направляющей кривой, определяющей направление переноса, либо при помощи соотношений координат по осям  $X$  и  $Y$  [1].



**Рис. 1 – Поверхности, образованные на контуре с симметрией:**  
 а) подвижной параболической образующей; б) кривой подвижной образующей  
**Fig. 1 – Surfaces formed on a contour with symmetry:**  
 a) a moving parabolic generatrix; b) a curved moving generatrix

Для построения поверхности диагонального переноса для плоского ромбического контура могут быть полезны следующие соотношения между декартовыми координатами  $x, y$  и косоугольными координатами  $u, v$ .

$$x = \frac{(u+v) \cdot c}{\sqrt{c^2 + d^2}} - c; \quad y = \frac{(v-u) \cdot d}{\sqrt{c^2 + d^2}},$$

где  $c$  и  $d$  – свободные числа.

Для создания поверхности было подобрано соотношение:

$$c = 2, \quad d = 1, \quad H = 24, \quad a = 20, \quad b = 4.$$

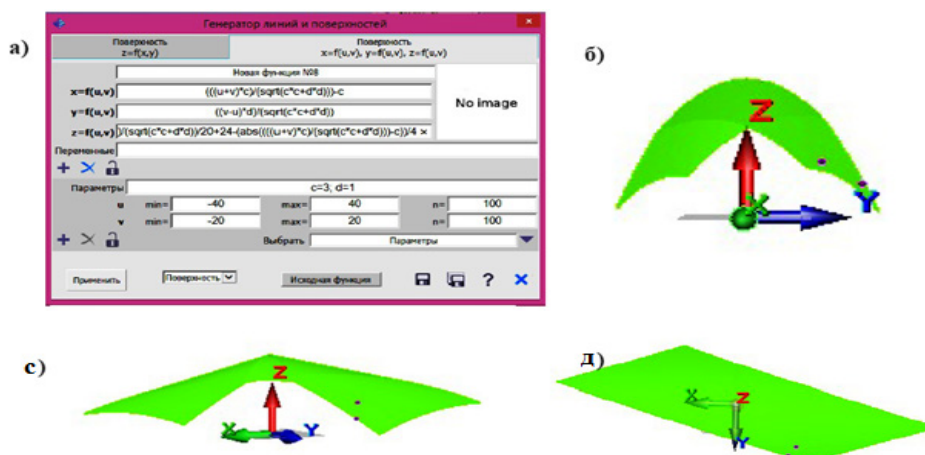
За основу была взята формула:

$$z = -\frac{y^2}{a} + H - \frac{\sqrt{x}}{b},$$

где  $x$  и  $y$  – соответственно соотношения между декартовыми координатами  $x, y$ ;  
 $H$  – нужная высота по  $z$ ;  
 $a$  и  $b$  – свободные числа.

Приняты следующие параметры:  $c = 2, d = 1, H = 24, a = 20, b = 4$ .

С помощью генератора линий и поверхностей в программном комплексе САПФИР, при свободно заданных числах создаем модель (рис. 2).



**Рис. 2 – Создание поверхности: а) генератор; б) вид сверху; с) справа; д) сзади**  
**Fig. 2 – Surface creation: a) generator; b) top view; c) right; d) back**

Выполнен подбор оптимальной формы поверхности диагонального переноса. При изменении числа  $c$  в меньшую сторону ( $c = 1$ ) – боковые углы ромба уходят вниз (рис. 3а). При изменении числа  $c$  в большую сторону ( $c = 5$ ) – ромб сужается, углы более прямые (рис. 3б). При уменьшении параметра  $d$  ( $d = 0,5$ ) – ромб сужается, углы более

прямые (рис. 3с). При увеличении параметра  $d$  ( $d = 5$ ) – боковые углы ромба уходят вниз (рис. 3д).

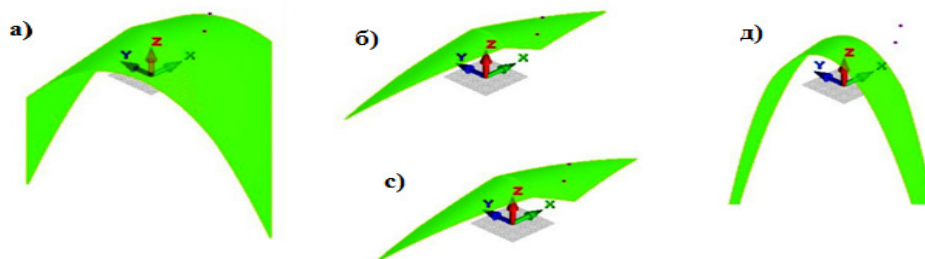


Рис. 3 – Изменение поверхности при смене числа  $c$  и  $d$ :

а)  $c = 1$ ; б)  $c = 5$ ; в)  $d = 0,5$ ; д)  $d = 5$

Fig. 3 – Change in surface area when changing the numbers  $c$  and  $d$ :

а)  $c = 1$ ; б)  $c = 5$ ; в)  $d = 0,5$ ; д)  $d = 5$

При изменении параметра  $a$  в меньшую сторону ( $a = 5$ ) – форма расширяется, удлиняется, боковые углы уходят вниз (рис. 4а). При изменении числа  $a$  в большую сторону ( $a = 50$ ) – форма удлиняется, сужается и сплющивается (рис. 4б). При изменении числа  $b$  в меньшую сторону ( $b = 1$ ) – излом становится больше, внешние углы тянутся друг к другу (рис.4с). При изменении числа  $b$  в большую сторону ( $b = 100$ ) – уходит излом, форма выпрямляется (рис. 4д).

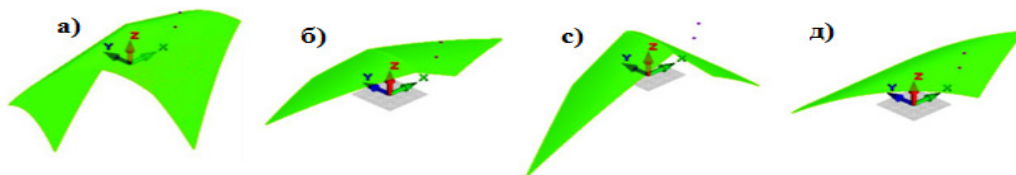


Рис. 4 – Изменение поверхности при смене числа  $a$  и  $b$ :

а)  $a = 5$ ; б)  $a = 50$ ; в)  $b = 1$ ; д)  $b = 100$ .

Fig. 4 – Change in surface area when changing the numbers  $a$  and  $b$ :

а)  $a = 5$ ; б)  $a = 50$ ; в)  $b = 1$ ; д)  $b = 100$ .

Концепция здания выставочного павильона разработана на основе варианта заданных параметрами:  $c = 2$ ,  $d = 1$ ,  $H = 24$ ,  $a = 20$ ,  $b = 4$  (рис. 5а). Проектируемый объект – здание параметрической архитектуры с функциональным назначением выставочного павильона со свободной планировкой внутреннего пространства (рис. 5б) [2].

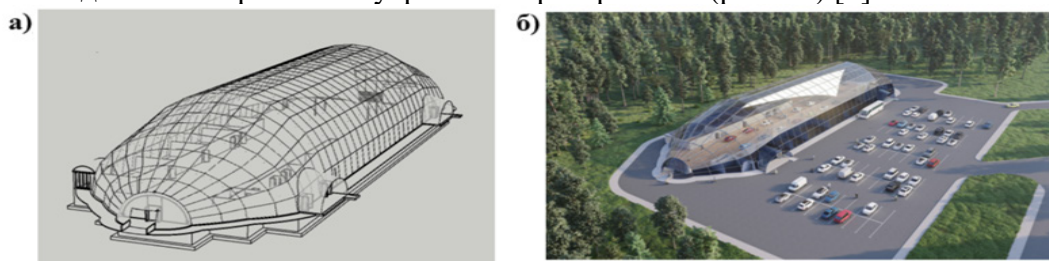


Рис. 5 – Выставочный павильон: а) концепция; б) визуализация

Fig. 5 – Exhibition pavilion: а) concept; б) visualization

Выставочный павильон, предназначен для комплектования выставок автомобильной техники и других экспозиционных выставок аналогичной тематики. Экспозиционный зал расположен в центральной части здания, техника заезжает в здание через ворота, расположенные в торце помещения. Вдоль наружных стен и в подвале располагаются бытовые и административно-хозяйственные помещения. Конструктивная схема здания – каркасная.

Арки металлические решетчатые бесшарнирные опираются на монолитные колонны подвала. Пояса и решетка из прямоугольного сварного профиля «Молодечно». Связи металлические из труб 108x12 по ГОСТ 8732-78. Металлические конструкции выполняются из стали классов С245 и С345.

Под центральной частью здания располагается подвал, в котором предполагается размещение инженерного оборудования и вспомогательных помещений. Высота подвала 3м. Ленточные фундаменты на естественном основании монолитные железобетонные шириной 400–2000 мм из бетона класса В40. Перекрытие подвала монолитное железобетонное толщиной 2500 мм из бетона класса В30. Колонны подвала монолитные железобетонные сечением 400x400 мм из бетона класса В30. Несущие стены подвала монолитные железобетонные из бетона класса В40.

**Методы исследования.** Выполнен численный эксперимент по регулированию напряженно-деформированного состояния несущих конструкций в программном комплексе Лира-САПР [3-4]. Произведен предварительный расчет средней арки сводчатого покрытия (рис. 6). Рассмотрено два варианта расчетной схемы:

- в первом варианте стрела подъема арки составляет 10 м при пролете 30м ( $f/L=1/3$ );
- во втором стрела подъема составляет 15м при пролете 30м ( $f/L=1/2$ ).

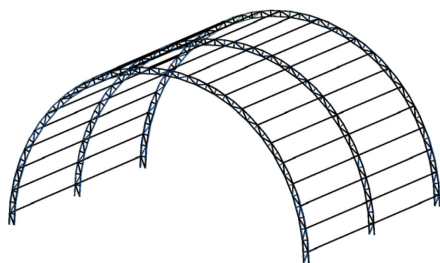


Рис. 6 – Арки покрытия  
Fig. 6 – Roof arches

В рассмотренных случаях арки являются высокими ( $f/L > 1/4$ ), очерченными по дуге окружности. Поперечное сечение элементов - 2 уголка 75x6. Основной нагрузкой является собственный вес конструкции и снеговая нагрузка. Нагрузка от снега определяется по требованиям нормативной документации. Величина собственного веса линейно зависит от геометрических параметров арки и достигает наибольшего значения во втором варианте геометрической схемы при  $f/L = 1/2$ .

Арка является распорной системой. Величина распора при постоянной нагрузке зависит от геометрических параметров конструкции. Для данной арки пролетом 30 м при стреле подъема в 15 м величина распора значительно меньше, чем при стреле подъема 10 м, что значительно упрощает конструкцию фундаментов. Малый распор снимает необходимость увеличивать высоту сечения арки у опор, что позволяет рациональнее использовать площадь внутренних помещений. Учитывая данные обстоятельства, а также то, что в обоих вариантах геометрических схем величина собственного веса конструкций значительно меньше полезных нагрузок, за основной принят второй вариант расчетной схемы.

Для проверки и подбора сечений элементов арки заданы две схемы загрузки снеговой нагрузкой в соответствии с требованиями действующей нормативной документации (рис. 7 а-б).

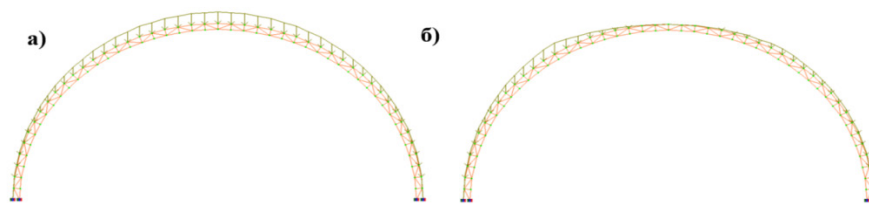
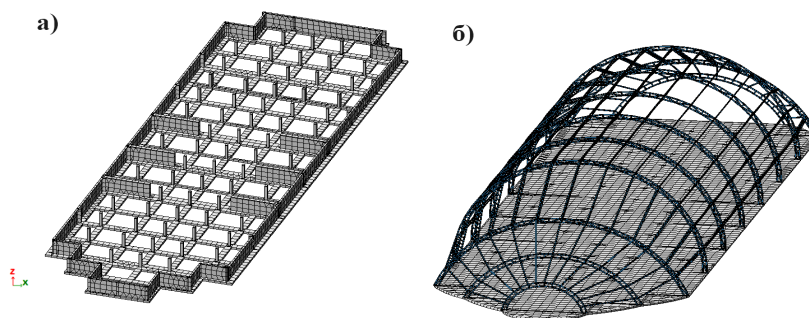


Рис. 7 – Схемы нагрузки от снега: а) первая схема; б) вторая схема  
Fig. 7 – Snow load diagrams: a) first diagram; b) second diagram

**Обсуждение результатов.** Произведен статический расчет. Наибольшие усилия возникают при первом варианте загрузки снеговой нагрузкой. Именно эти усилия, а также характеристики конструктивных элементов являются исходными данными для проверки и подбора сечений.

Выполнен подбор сечений элементов арочного покрытия. После подбора сечений произведен повторный расчет. Наибольшие перемещения составляют 99,6 мм, что не превышает допустимого значения  $l/275 = 30000/275 = 109$  мм, следовательно, выбранная расчетная схема пригодна для дальнейших расчетов.

Для определения усилий и подбора сечений и армирования элементов конструкций рассмотрена расчетная схема, представляющая собой пространственную плитно-стержневую систему (колонны, балки, элементы покрытия), разработанная в программном комплексе Лира-САПР (рис. 8) [5-6].

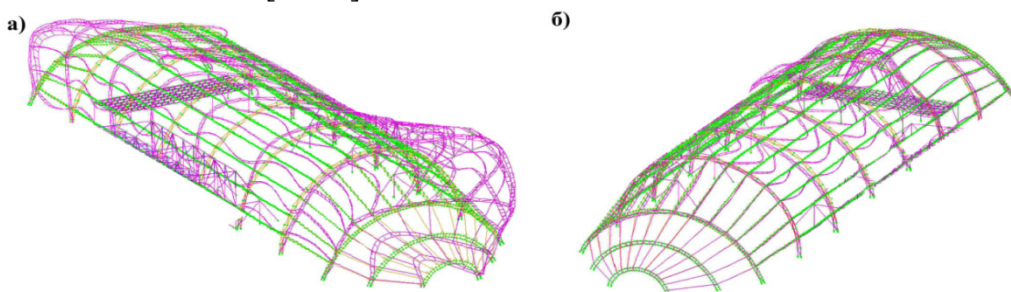


**Рис. 8 – Конечно-элементная модель: а) подвал; б) первый этаж**

**Fig. 8 – Finite element model: a) basement; b) first floor**

Конструкция рассчитана на 13 загрузок: 8 статических, 2 динамических и 6 особых. В статические нагрузки включены собственный вес, постоянные, длительные, кратковременные, снеговые (2 варианта), ветер вдоль и поперек здания. В динамических нагрузках учтена пульсационная составляющая ветровой нагрузки. Особыми нагрузками выполнено моделирование сейсмических нагрузок по главным осям здания (включая вертикальную составляющую).

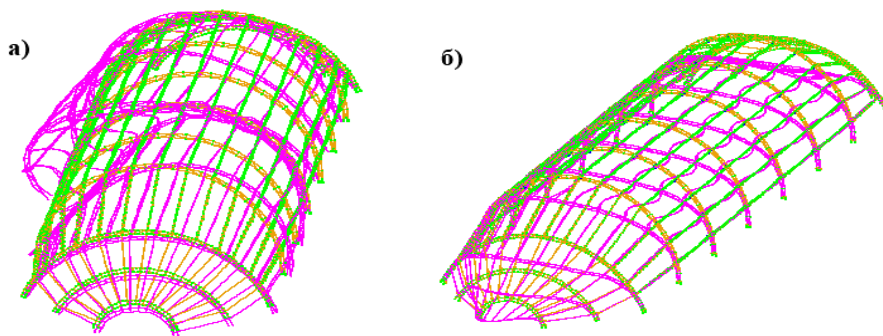
Количество форм колебаний, учитываемых при расчете на сейсмическую нагрузку, в первом приближении составляющее 20, было затем увеличено до 1500, а вместо жесткого закрепления основания по направлениям  $X$ ,  $Y$  введены податливые заделки [7-8]. Это решение позволяет увеличить сумму эффективных модальных масс, учтенных в расчете, до 90% для соответствия расчета требованиям действующей нормативной документации (рис. 9) [9]. Выполнен общий расчет каркаса здания. Анализ результатов показал, что полученные компоненты напряженно-деформированного состояния с учетом динамических и особых воздействий не превышают нормативных значений, принятых сечений металлического каркаса здания достаточно [10-11].



**Рис. 9 – Формы колебаний: а) 7-я форма; б) 157-я форма**

**Fig. 9 – Oscillation modes: a) 7th mode; b) 157th mode**

Дополнительно произведен расчет каркаса на устойчивость в двух расчетных сочетаниях: с ветром в поперечном направлении и с ветром в продольном направлении. На рис. 10 показаны первые формы потери устойчивости.



**Рис. 10 – Первая форма потери устойчивости:**  
**а) в первом расчетном сочетании; б) во втором расчетном сочетании**  
**Fig. 10 – First form of stability loss:**

**a) in the first design combination; b) in the second design combination**

Наименьший коэффициент запаса составляет 5,07, что превышает минимально допустимый по актуальной нормативной документации.

**Вывод.** Выполненное исследование формообразования поверхности диагонального переноса показало, что разработанная концепция аналитической поверхности подходит для проектирования каркаса здания выставочного павильона. Проведенный численный эксперимент позволил разработать оптимальную расчетную схему проектируемого объекта параметрической архитектуры. Исследование поведения каркаса здания при проектных воздействиях, включая исследование динамического отклика и устойчивости покрытия, позволило считать принятые конструктивными решения надежными и экономичными.

#### Библиографический список:

1. Гринько Е.А. Классификация аналитических поверхностей применительно к параметрической архитектуре и машиностроению. Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. – 2018. – Т. 19, № 4. – С. 438-456.
2. Кравченко Г.М., Данилейко И.Ю., Думбай В.А. Исследование динамических параметров консольного покрытия уникального здания технического музея. НАУКА, ОБРАЗОВАНИЕ и ИННОВАЦИИ: сборник статей по итогам Международной научно-практической конференции: в 3 частях, Казань, 12 июля 2017 года. Том Часть 2. – Казань: Общество с ограниченной ответственностью "Агентство международных исследований", 2017. – С. 68-73.
3. Водопьянов Р.Ю., Титок В.П., Артамонова А.Е., Ромашкина М.А. Под редакцией академика РААСН Городецкого А.С. Программный комплекс лира-сапр®. Руководство пользователя. Обучающие примеры. Электронное издание, 2017г., – 535 с.
4. Стрелец-Стрелецкий Е.Б., Журавлев А.В., Водопьянов Р.Ю. Под ред. Академика РААСН, док. техн. наук проф. Городецкого А.С. ЛИРА-САПР. Книга I. Основы. Изд-во LIRALAND, 2019. – 154с.
5. Agakhanov, E.K. Stress modelling in natural foundation /E.K. Agakhanov, R.E. Agakhanova, M.K. Agakhanov //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Rostov-on-Don, 20–22 октября 2020 года. Rostov-on-Don, 2020. – P. 012072. DOI 10.1088/1757-899X/1001/1/012072. EDN UXTXEO.
6. Агаханов, Э.К. Эквивалентность грунтов в предельном напряженном состоянии / Э.К. Агаханов, М.К. Агаханов, Г.Г. Габибулаев //Системные технологии. – 2021. – № 4(41). – С. 103-109. – DOI 10.55287/22275398\_2021\_4\_103.
7. Моделирование пульсационной составляющей ветровой нагрузки на каркас здания по нескольким методикам расчета / Г.М. Кравченко, Е.В. Труфанова, И.В. Кондрик, И.А. Хатхоху // Инженерный вестник Дона. – 2017. – № 2(45). – С. 98.
8. Simbirkin V. Analysis of Reinforced Concrete Loadbearing Systems of Multistorey Buildings. Modern Building Materials, Structures and Techniques: CD-ROM Proceedings of the 8th International Conference, Vilnius, May 19-21, 2004.c.98-99.
9. Туровский С.В. Влияния собственных форм колебания многоэтажного каркасного здания на пространственную работу сооружения//Вестник современных исследований. 2019. № 3.13(30). – С. 184-187.
10. Кравченко Г.М. Рациональное проектирование элементов пространственного каркаса здания / Г.М. Кравченко, Е. В. Труфанова, Е. В. Ладная //Инженерный вестник Дона. – 2017. – № 1(44). – С. 59.
11. Адищев, В.В. Верификация численно-аналитического метода определения прогибов с помощью численного моделирования / В.В. Адищев, В.В. Мальцев, М.Н. Данилов // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2017. – № 9(705). – С. 15-24.

#### References:

1. Grinko, E.A. Classification of Analytical Surfaces Applied to Parametric Architecture and Mechanical Engineering. *Bulletin of Peoples' Friendship University of Russia. Series: Engineering Research*. 2018;19(4):. 438-456. (In Russ)
2. Kravchenko, G.M., Danileiko, I.Yu., Dumbay, V.A. Study of the Dynamic Parameters of the Cantilever Roof of a Unique Building of a Technical Museum. SCIENCE, EDUCATION, and INNOVATION: Collection of Articles Based on the Results of the International Scientific and Practical Conference: in 3 Parts, Kazan, July 12, 2017; Part 2. – Kazan: International Research Agency, Limited Liability Company, 2017: 68-73. (In Russ)
3. Vodopyanov R.Yu., Titok V.P., Artamonova A.E., Romashkina M.A. Edited by Academician of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences Gorodetsky A.S. LIRA-SAPR® Software Package. User's Manual. Tutorials. Electronic publication, 2017:535. (In Russ)
4. Strelets-Streletsky E.B., Zhuravlev A.V., Vodopyanov R.Yu. Edited by Academician of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Doctor of Engineering Sciences, prof. Gorodetsky A.S. LIRA-SAPR. Book I. Basics. LIRALAND Publishing House, 2019:154. (In Russ)
5. Agakhanov, E.K. Stress modeling in natural foundation /E.K. Agakhanov, R.E. Agakhanova, M.K. Agakhanov //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Rostov-on-Don, October 20–22, 2020. Rostov-on-Don, 2020. – P. 012072. DOI 10.1088/1757-899X/1001/1/012072. EDN UXTXEO. (In Russ)
6. Agakhanov, E.K. Equivalence of soils in the ultimate stress state / E.K. Agakhanov, M.K. Agakhanov, G.G. Gabibulaev. *System technologies*. 2021;4(41):103-109. – DOI 10.55287/22275398\_2021\_4\_103. (In Russ)
7. Modeling of the pulsation component of the wind load on the building frame using several calculation methods / G.M. Kravchenko, E.V. Trufanova, I.V. Kondrik, I.A. Khatkhokhu. *Engineering Bulletin of the Don*. 2017;2 (45): 98. (In Russ)
8. Simbirkin V. Analysis of Reinforced Concrete Loadbearing Systems of Multistorey Buildings. Modern Building Materials, Structures and Techniques: CD-ROM Proceedings of the 8th International Conference, Vilnius, May 19-21, 2004: 98-99. (In Russ)
9. Turovsky S.V. Influence of natural vibration modes of a multi-story frame (In Russ)
10. Kravchenko G.M. Rational design of elements of the spatial framework of a building / G.M. Kravchenko, E.V. Trufanova, E.V. Ladnaya. *Engineering Bulletin of the Don*. 2017;1(44):59. (In Russ)
11. Adishchev, V.V. Verification of the numerical-analytical method for determining deflections using numerical modeling / V.V. Adishchev, V.V. Maltsev, M.N. Danilov. *News of higher educational institutions. Construction*. 2017;9 (705):15-24. (In Russ)

#### Сведения об авторах:

Агаханов Элифхан Керимханович, доктор технических наук, профессор, профессор, кафедра «Транспортные сооружения и строительные материалы»; [Elifhan@bk.ru](mailto:Elifhan@bk.ru)

Агаханов Мурад Керимханович, кандидат технических наук, доцент, доцент, кафедра «Сопrotивление материалов»; [muradak@mail.ru](mailto:muradak@mail.ru)

Труфанова Елена Васильевна, кандидат технических наук, доцент, доцент, кафедра «Строительная механика и теория сооружений»; [el.trufanova@mail.ru](mailto:el.trufanova@mail.ru)

Муртазалиев Гелани Муртазалиевич, доктор технических наук, профессор, кафедра «Сопrotивление материалов, теоретической и строительной механики»; [ventav@mail.ru](mailto:ventav@mail.ru)

#### Information about authors:

Elifkhan K. Agakhanov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Department of Transport Facilities and Construction Materials; [Elifhan@bk.ru](mailto:Elifhan@bk.ru),

Murad K. Agakhanov, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Assoc. Prof., Department of Strength of Materials; [muradak@mail.ru](mailto:muradak@mail.ru)

Elena V. Trufanova, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Assoc. Prof., Department of Technical Mechanics; [el.trufanova@mail.ru](mailto:el.trufanova@mail.ru)

Gelani M. Murtazaliev, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department Resistance of Materials, Theoretical and Construction Mechanics; [ventav@mail.ru](mailto:ventav@mail.ru)

#### Конфликт интересов / Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 24.09.2025.

Одобрена после рецензирования/Reviced 17.10.2025.

Принята в печать /Accepted for publication 10.11.2025.

**Численно-аналитическое моделирование ползучести пластин при изгибе**  
**Т.А. Волосатова<sup>1</sup>, А.Д. Мерзлякова<sup>2</sup>, М.В. Беспалов<sup>3</sup>, С.В. Литвинов<sup>1</sup>, М.А. Магомедов<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>Донской государственный университет,

<sup>1</sup>344003, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина 1, Россия,

<sup>2</sup>Российский университет транспорта, Россия,

<sup>2</sup>127994, ГСП-4, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9,

<sup>3</sup>Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы,  
117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6, Россия,

<sup>4</sup>Дагестанский государственный технический университет,  
<sup>4</sup>367015, г. Махачкала, пр. Имама Шамиля, 70, Россия

**Резюме. Цель.** В работе рассматривается задача о напряженном-деформированном состоянии жесткой пластинки при изгибе в условиях ползучести, с различными граничными условиями. Получено разрешающее линейное неоднородное дифференциальное уравнение четвертого порядка относительно прогиба. Решение приводится численно аналитическим методом типа Мориса Леви в программном комплексе MATLAB с использованием одианрных тригонометрических рядов. Нелинейное уравнение Максвелла-Гуревича использовано как уравнение состояния между деформациями ползучести и напряжениями. **Метод.** Для определения деформаций ползучести применялась линейная аппроксимация первой производной по времени, метод Эйлера. Для верификации решения задачи был произведен расчет пластинки из вторичного ПВХ, выполненный методом сеток. Методика апробирована путем сравнения решения с расчетом и других известных исследователей. **Результат.** Разработана программа для расчета в пакете MATLAB с возможностью вариации исходных данных и выводом графика зависимости перемещений, напряжений от времени. На примере пластинки из вторичного поливинилхлорида показано, что напряжения в процессе ползучести меняются незначительно. **Вывод.** Предложенный подход может быть применен к анализу напряженно-деформированного состояния и несущей способности также и железобетонной плиты. Ограничений по граничным условиям и вида нагружения нет, а материалом пластины может быть не только полимеры и композиты строительного назначения, но и бетон.

**Ключевые слова:** ползучесть полимера, неупругие коэффициенты, относительная деформация, уравнение связи Максвелла-Гуревича, изгибающие моменты, метод Эйлера, метод М. Леви, метод Навье

**Для цитирования:** Т.А. Волосатова, А.Д. Мерзлякова, М.В. Беспалов, С.В. Литвинов, М.А. Магомедов. Численно-аналитическое моделирование ползучести пластин при изгибе. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025;52(4):196-206. DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-4-196-206

**Numerical and analytical modeling of plate creep under bending**

**T.A. Volosatova<sup>1</sup>, A.D. Merzliakova<sup>2</sup>, M.V. Bespalov<sup>3</sup>, S.V. Litvinov<sup>1</sup>, M.A. Magomedov<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>Don State University,

<sup>1</sup>344003, Rostov-on-Don, Gagarin Square 1, Russia,

<sup>2</sup>Russian University of Transport, Russia,

<sup>2</sup>127994, GSP-4, Moscow, Obraztsova Street, Bldg. 9,

<sup>3</sup>Patrice Lumumba Peoples' Friendship University of Russia,

<sup>3</sup>6 Miklukho-Maklaya Street, Moscow 117198, Russia,

<sup>4</sup>Daghestan State Technical University,

<sup>4</sup>70 I. Shamilya Ave., Makhachkala 367015, Russia

**Abstract. Objective.** This paper considers the stress-strain state of a rigid plate subject to bending under creep conditions, with various boundary conditions. A resolving linear inhomogeneous differential equation of the fourth order with respect to deflection is obtained. The solution is numerically solved using a Maurice-Lévy-type analytical method in the MATLAB software package using unary trigonometric series. The nonlinear Maxwell-Gurevich equation is used as the equation of state between creep strains and stresses. **Method.** A linear approximation of the first time derivative, the Euler method, was used to determine creep strains. To verify the solution, a mesh calculation was performed on a recycled PVC plate [1]. The method was validated by comparing the solution with calculations by other renowned researchers. **Result.** A program was developed for calculations in the MATLAB package with the ability to vary the initial data and plot a graph of displacements and stresses versus time. Using a recycled PVC plate as an example, it is shown that stresses change insignificantly during creep. **Conclusion.** The proposed approach can be applied to the analysis of the stress-strain state and the load-bearing capacity of a reinforced concrete slab. There are no restrictions on boundary conditions or loading type, and the plate material can be not only polymers and composites for construction purposes, but also concrete.

**Keywords:** polymer creep, inelastic coefficients, relative deformation, Maxwell-Gurevich constraint equation, bending moments, Euler method, M. Levy method, Navier method

**For citation:** T.A.Volosatova, A.D. Merzliakova, M.V. Bepalov, S.V. Litvinov, M.A. Magomedov. Numerical and analytical modeling of plate creep under bending. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2025;52(4):196-206. (In Russ) DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-4-196-206

**Введение.** Идея о том, что любая периодическая функция может быть представлена в виде ряда гармонически связанных синусов и косинусов была предложена французским математиком бароном Жан-Батистом Жозефом Фурье. Разложение в бесконечный ряд по тригонометрическим функциям справедливо также для любых непериодических функций, определенных на произвольном интервале (просто разложенная функция будет периодически повторяться за пределами рассматриваемого интервала). Это гениальное изобретение благодаря развитию компьютерной техники получило огромное число практических приложений и легло в основу множества современных технологий таких, как сжатие мультимедиа, беспроводная передача данных, спектральный анализ, машинное обучение и т.д.

Тригонометрические ряды позволяют получить элегантное решение ряда краевых задач в теории пластин и оболочек. В литературе методы применения разложений в тригонометрические ряды часто ассоциируются с именем французского инженера-механика Клода-Луи Навье, который в 1820 году получил решение для прогиба и напряжений прямоугольной шарнирно-опёртой пластины и Морисом Леви, который получил точное решение задачи об изгибе пластины в упругой постановке в 1989 году. В своей работе М. Леви представил решение в виде однократного ряда специального вида для пластины, с граничными условиями, которые будут рассмотрены в данной статье в условиях вязкоупругости. Это стало важным вкладом в теорию изгиба пластин, дополнив более раннее исследования таких ученых, как Лагранж, Пуассон, Навье и др. Имеющиеся экспериментальные исследования неоднократно подтвердили, что действие длительных нагрузок приводит к изменению процесса деформирования. Факторы силового сопротивления полимеров и композитов строительного назначения с учетом совместного действия нелинейности и неравновесности деформирования, статических и динамических нагружений требуют дополнительного изучения для решения статически неопределимых систем.

**Постановка задачи.** Разработка новых и совершенствование существующих методов моделирования и расчета различных состояний и процессов в конструкциях из полимеров, вопросы реологического расчета, особенно нелинейного, для пластин и оболочек остаются актуальными и по-прежнему является одной из актуальных проблем.

Для упругой шарнирно опертой по контуру пластинки имеется аналитическое решение Навье в двойных тригонометрических рядах [1]. Обобщением этого решения на случай

пластинки из вязкоупругого материала было сделано в работе [2]. В качестве разрешающего уравнения авторами [2] приведено обобщенное уравнение Софи-Жермен:

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \frac{1}{D} \left\{ q - \left( \frac{\partial^2 M_x^{cr}}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial^2 m^{cr}}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 M_y^{cr}}{\partial y^2} \right) \right\} \quad (1)$$

Определение функции  $w(x, y)$ , удовлетворяющей дифференциальному уравнению (1), довольно просто решается для прямоугольной пластины, шарнирно опертой по краям и нагруженной произвольной нагрузкой в упругой постановке (решение К-Л. Навье). Решение на случай пластинки с учетом реологических свойств материала в замкнутом виде не представляется возможным и решение можно привести только численно-аналитическим методом, что, собственно, сделано было в работе [2] с использованием двойных тригонометрических рядов. Нами предлагается более универсальный метод решения задачи об изгибе прямоугольной пластины в условиях ползучести в одинарных рядах предложенным Морисом Леви, что существенно расширяет класс задач, допускающих решение. В упругой постановке впервые решение было представлено в работе Эставана [3]. Численное решение с использованием МКР, МКЭ для пластин и оболочек можно найти в работах [4-13].

**Методы исследования.** Для верификации правильности решения приведем вначале решение для шарнирно опертой пластины методом типа М. Леви. Рассмотрим прямоугольную пластину, шарнирно опертую по всем четырем сторонам под действием произвольной нагрузки  $q(x, y)$  (рис. 1) и вторую схему (рис. 2) – два края шарнирное закрепление, 2 края – защемление.

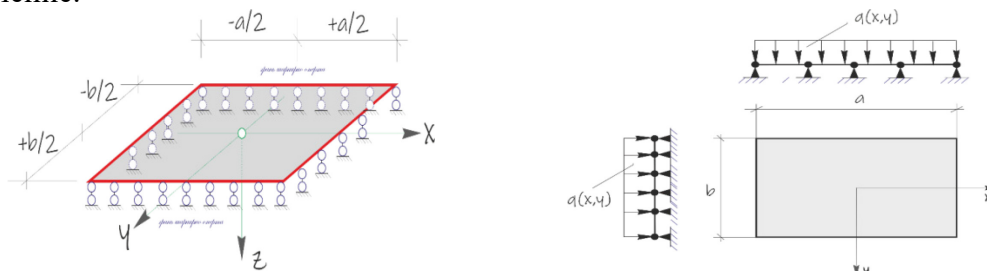


Рис. 1 – Расчетная схема для пластинки при решении типа К-Л. Навье  
 Fig. 1 – Calculation scheme for a plate with a K-L Navier solution

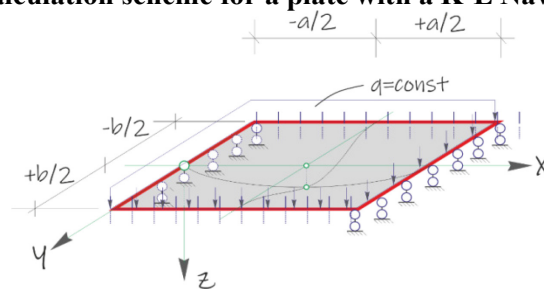


Рис. 2 – Расчетная схема для пластинки при решении типа М. Леви  
 Fig. 2 – Calculation scheme for a plate with a solution of the M. Levy type

Аналогично решению Файлона в плоской задаче примем уравнение поверхности прогибов  $w(x, y)$  в виде:

$$w(x, y) = \sum_{k=1}^{\infty} Y_k(y) \sin \frac{k\pi x}{a} \quad (2)$$

где  $Y_k(y)$  – неизвестная функция от  $y$ .

Очевидно, что ряд (2) удовлетворяет граничным условиям опирания пластины на жесткие шарнирные опоры двух параллельных кромок

$$\text{при } x = 0 \quad w = 0; \quad \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \rightarrow \sum_{k=1}^{\infty} -Y_k \frac{k^2 \pi^2}{a^2} \sin \frac{k\pi x}{a} = 0$$

$$\text{при } x = a \quad w = 0; \quad \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \rightarrow \sum_{k=1}^{\infty} -Y_k \frac{k^2 \pi^2}{a^2} \sin \frac{k\pi x}{a} = 0$$

Для того чтобы ряд (2) удовлетворял также дифференциальному уравнению (1) и граничным условиям на двух других краях, необходимо соответствующим образом подобрать функцию  $Y_k(y)$ .

После подстановки принятого ряда в разрешающее уравнение (1), запишем левую часть уравнения

$$\begin{aligned} \nabla^2 w &= \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = \sum_{k=1}^{\infty} -Y_k \frac{k^2 \pi^2}{a^2} \sin \frac{k\pi x}{a} + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\partial^2 Y_k}{\partial y^2} \sin \frac{k\pi x}{a} = \\ &= \sum_{k=1}^{\infty} \left( \frac{\partial^2 Y_k}{\partial y^2} - Y_k \frac{k^2 \pi^2}{a^2} \right) \sin \frac{k\pi x}{a}; \\ \nabla^2 \nabla^2 w &= \sum_{k=1}^{\infty} \left[ \frac{\partial^4 Y_k}{\partial y^4} - 2 \frac{\partial^2 Y_k}{\partial y^2} \frac{k^2 \pi^2}{a^2} + \frac{k^4 \pi^4}{a^4} Y_k \right] \sin \frac{k\pi x}{a} \end{aligned} \quad (3)$$

Как и ранее, нагрузку представим в виде ряда:

$$\begin{aligned} q(x, y) &= \sum_{k=1}^{\infty} q_k(y) \sin \frac{k\pi x}{a}, \\ q^{cr}(x, y) &= \sum_{k=1}^{\infty} q_k^{cr}(y) \sin \frac{k\pi x}{a}, \end{aligned} \quad (4)$$

Для определения коэффициентов произвольного члена ряда (4) умножим правую и левую часть равенства на  $\sin \frac{k\pi x}{a}$  и проинтегрировав в пределах от 0 до  $a$  получим:

$$q_k(y) = \frac{2}{b} \int_0^b q(x, y) \sin \frac{k\pi x}{a}, \quad (5)$$

Второй коэффициент разложения  $q_k^{cr}$  можно, как и ранее, вычислить только численно, где в разложении функции будут присутствовать только нечетные члены.

После подстановки выражений (3) — (5) в дифференциальное уравнение (1) оно принимает вид:

$$\begin{aligned} \sum_{k=1,3,5\dots}^{\infty} \left[ \frac{\partial^4 Y_k}{\partial y^4} - 2 \frac{\partial^2 Y_k}{\partial y^2} \frac{k^2 \pi^2}{a^2} + \frac{k^4 \pi^4}{a^4} Y_k \right] \sin \frac{k\pi x}{a} = \\ = \sum_{k=1,3,5\dots}^{\infty} \frac{(q_k + q_k^{cr})}{D} \sin \frac{k\pi x}{a} \end{aligned} \quad (6)$$

Данное уравнение распадается на ряд обыкновенных дифференциальных уравнений. Напишем  $k$ -е уравнение ряда

$$\frac{\partial^4 Y_k}{\partial y^4} - 2\lambda^2 \frac{\partial^2 Y_k}{\partial y^2} + \lambda^4 Y_k = \frac{(q_k + q_k^{cr})}{D} \quad (7)$$

Здесь  $\lambda = \frac{k\pi}{a}$ ;

Не останавливаясь на этапах интегрирования этого уравнения, напишем его общий интеграл:

$$Y_k = Y_{k1} + Y_{k2} \quad (8)$$

Первое слагаемое представляет собой решение однородного уравнения, когда в правой части (7) стоит ноль. Решение можно представить, как в показательной форме, так и гипербола тригонометрической. Остановимся на последней:

$$Y_{k1}(y) = C_{1k}ch\lambda y + C_{2k}\lambda ysh\lambda y + C_{3k}sh\lambda y + C_{4k}\lambda ych\lambda y \quad (9)$$

Первые два слагаемых составляют симметричную часть решения относительно оси  $x$ , а вторые — антисимметричную. Произвольные постоянные  $C_{1k}, C_{2k}, C_{3k}, C_{4k}$  находятся из условий на продольных кромках пластины  $y = \pm \frac{b}{2}$ .

Вторая часть суммы (8) — это частное решение уравнения (7), которое подбирается так, чтобы при подстановке в это уравнение получилось равенство, т.е. оно непосредственно зависит от вида функции  $q_k(y)$ . Например, если  $q_k$  — линейная функция от  $y$ , например

$$q_k = A + By$$

то подстановкой легко убедиться в том, что

$$Y_{k2} = \frac{1}{D\lambda^4}(A + By) \quad (10)$$

Внутренние усилия выражаются через функцию  $Y_k$ .

Таким образом, в каждой конкретной задаче требуется определить коэффициенты разложения заданной нагрузки по (4), составить выражение  $Y_k$  (8) и найти произвольные постоянные из условий на кромках  $y = \pm b/2$ . После этого по (2) вычисляются прогибы и соответствующие внутренние усилия в пластине.

Рассмотрим примеры, когда равномерной нагрузкой  $q$  загружена пластина с шарнирно опертыми краями  $x = 0, x = a$  и заделанными кромками  $y = \pm b/2$  (рис. 1). Тогда функция  $w$  должна быть четной относительно  $x$  (упругая поверхность симметрична относительно оси  $x$ ). То есть:

$$\text{при } y = 0 \quad \frac{\partial w}{\partial y} = 0 \quad \text{и} \quad \frac{\partial^3 w}{\partial y^3} = 0.$$

Следовательно,  $C_{3k} = 0, C_{4k} = 0$  так как функции  $sh\lambda y$  и  $\lambda ych\lambda y$  — нечетные.

$$\text{при } q(x, y) = q = const, \quad q_k = \frac{2q}{k\pi}(1 - \cos k\pi).$$

$$\text{если } k \text{ — четное, то } q_k = 0;$$

$$\text{если } k \text{ — нечетное, } q_k = \frac{4q}{k\pi}$$

Приведем два варианта оставшихся 2-х граничных условий:

1. шарнир—шарнир (для сравнения с задачей типа Навье)

$$\left( y = \pm \frac{a}{2} \rightarrow w = 0, \quad \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = 0 \right)$$

2. защемление—защемление

$$\left( y = \pm \frac{a}{2} \rightarrow w = 0, \quad \frac{\partial w}{\partial y} = 0. \right)$$

#### 1-й вариант (полное шарнирное опирание)

Учитывая симметрию относительно оси  $x$ , в выражении (9) для  $Y_{k1}$  удерживаем только первые два слагаемых, а  $Y_{k2}$  принимаем по (10) при  $A = \frac{4q}{k\pi}, B = 0$ .

$$Y_k = C_{1k}ch\lambda y + C_{2k}\lambda ysh\lambda y + \frac{(q_k + q_k^{cr})}{\lambda^4 D}$$

Для отдельного члена ряда это дает

$$y = \pm \frac{b}{2}, \quad Y_k = 0, \quad \frac{\partial^2 Y_k}{\partial y^2} = 0 \quad \text{— шарнирное опирание} \quad (11)$$

$$Y_k = 0, \quad \underbrace{C_{1k}ch\lambda y + C_{2k}\lambda ysh\lambda y}_{Y_{k1}} + \underbrace{\frac{4(q + q^{cr})}{\lambda^4 D k \pi}}_{Y_{k2}} = 0$$

$$\frac{\partial^2 Y_k}{\partial y^2} = 0 \quad C_{1k}\lambda^2 ch\lambda y + C_{2k}(\lambda^2 ch\lambda y + \lambda^2 ch\lambda y + \lambda^3 ysh\lambda y) = 0$$

Уравнения запишем относительно  $C_{1k}$  и  $C_{2k}$  в матричном виде и сократив на  $\lambda^2$  в последнем выражении:

$$\begin{bmatrix} ch\alpha & \alpha sh\alpha \\ ch\alpha & (2ch\alpha + \alpha sh\alpha) \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} C_{1k} \\ C_{2k} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{(q_k + q_k^{cr})}{\lambda^4 D} \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\text{Здесь } \alpha = \lambda \frac{b}{2} = \frac{k\pi b}{2a}$$

Решение дает следующие значения постоянных интегрирования:

$$\begin{cases} C_{1k} = -\frac{(q_k + q_k^{cr})}{\lambda^4 D} \cdot \frac{(2ch\alpha + \alpha sh\alpha)}{2 \cdot ch^2\alpha} \\ C_{2k} = \frac{(q_k + q_k^{cr})}{\lambda^4 D} \cdot \frac{1}{2 \cdot ch\alpha} \end{cases} \quad (12)$$

Можно составить окончательные выражения для прогибов (2.38) или усилий. Так, выражение для прогибов получит вид

$$w(x, y) = \sum_{k=1}^{\infty} Y_k(y) \sin \frac{k\pi x}{a} = \frac{4(q + q^{cr})a^4}{\pi^5 D} \sum_{k=1,3,5}^{\infty} \frac{1}{k^5} \left[ 1 + \frac{\lambda ysh\lambda y}{2ch\alpha} - \frac{(2ch\alpha + \alpha sh\alpha)}{2ch^2\alpha} ch\lambda y \right] \sin \frac{k\pi x}{a} \quad (13)$$

**2-й вариант (2 края – шарнирное опирание, 2 края - защемление)**

$$y = \pm \frac{b}{2} \quad Y_k = 0, \quad \frac{\partial Y_k}{\partial y} = 0 \quad \text{опирание – защемление}$$

$$Y_k = 0, \quad \underbrace{C_{1k}ch\lambda y + C_{2k}\lambda ysh\lambda y}_{Y_{k1}} + \underbrace{\frac{4(q + q^{cr})}{\lambda^4 D k \pi}}_{Y_{k2}} = 0 \quad (14)$$

$$\frac{\partial Y_k}{\partial y} = 0 \quad C_{1k}\lambda sh\lambda y + C_{2k}(\lambda sh\lambda y + \lambda^2 ych\lambda y) = 0$$

Относительно  $C_{1k}$  и  $C_{2k}$  в матричном виде и сократив на  $\lambda$  во втором выражении:

$$\begin{bmatrix} ch\alpha & \alpha sh\alpha \\ sh\alpha & (sh\alpha + \alpha ch\alpha) \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} C_{1k} \\ C_{2k} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{4(q + q^{cr})}{\lambda^4 D k \pi} \\ 0 \end{bmatrix}$$

Решение дает следующие значения постоянных интегрирования:

$$\begin{cases} C_{1k} = -\frac{(q_k + q_k^{cr})}{\lambda^4 D} \cdot \frac{(sh\alpha + \alpha ch\alpha)}{(ch\alpha \cdot sh\alpha + \alpha)} \\ C_{2k} = \frac{(q_k + q_k^{cr})}{\lambda^4 D} \cdot \frac{sh\alpha}{(ch\alpha \cdot sh\alpha + \alpha)} \end{cases} \quad (15)$$

Окончательные выражения для прогибов (2) или усилий во втором варианте закрепления пластинки имеет вид:

$$w(x, y) = \sum_{k=1}^{\infty} Y_k(y) \sin \frac{k\pi x}{a} = \frac{4(q + q^{cr})a^4}{\pi^5 D} \sum_{k=1,3,5}^{\infty} \frac{1}{k^5} \left[ 1 + \frac{(\lambda ysh\lambda y \cdot sh\alpha) - (sh\alpha + \alpha ch\alpha) \cdot ch\lambda y}{(ch\alpha \cdot sh\alpha + \alpha)} \right]. \quad (16)$$

$$\cdot \sin \frac{k\pi x}{a}$$

Этот ряд (6) сходится очень быстро. Уже первое приближение (упругое решение) совпадает с точным решением до третьего знака. После того как функция  $w(x, y)$  найдена, вычислить изгибающие моменты и напряжения нетрудно. Изгибающие моменты и крутящий момент:

$$M_x = -D \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) - M_x^{cr} =$$

$$= D \sum_{k=1}^{\infty} \left( \lambda^2 Y_k - \nu \frac{\partial^2 Y_k}{\partial y^2} \right) \sin \frac{k\pi x}{a} - M_x^{cr} \quad (17)$$

$$M_y = -D \left( \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) - M_y^{cr} =$$

$$= D \sum_{k=1}^{\infty} \left( \lambda^2 \nu Y_k - \frac{\partial^2 Y_k}{\partial y^2} \right) \sin \frac{k\pi x}{a} - M_y^{cr} \quad (18)$$

$$m = -D(1 - \nu) \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} - m^{cr} =$$

$$= -D(1 - \nu) \sum_{k=1}^{\infty} \left( \lambda \frac{\partial Y_k}{\partial y} \right) \cos \frac{k\pi x}{a} - m^{cr} \quad (19)$$

$M_x^{cr}, M_y^{cr}, m^{cr}$  – определяются только численно как:

$$\begin{pmatrix} M_x^{cr} \\ M_y^{cr} \\ m^{cr} \end{pmatrix} = \frac{E}{1 - \nu^2} \begin{pmatrix} \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} [1 \quad \nu \quad 0] \begin{pmatrix} \varepsilon_x^{cr} \\ \varepsilon_y^{cr} \\ \gamma_{xy}^{cr} \end{pmatrix} z dz \\ \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} [\nu \quad 1 \quad 0] \begin{pmatrix} \varepsilon_x^{cr} \\ \varepsilon_y^{cr} \\ \gamma_{xy}^{cr} \end{pmatrix} z dz \\ \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \left[ 0 \quad 0 \quad \frac{(1 - \nu)}{2} \right] \begin{pmatrix} \varepsilon_x^{cr} \\ \varepsilon_y^{cr} \\ \gamma_{xy}^{cr} \end{pmatrix} z dz \end{pmatrix} \quad (20)$$

Напряжения определяются после нахождения прогиба, как:

$$\sigma_x = -\frac{E}{1 - \nu^2} \left[ z \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) + \varepsilon_x^{cr} + \nu \varepsilon_y^{cr} \right] =$$

$$= \frac{E}{1 - \nu^2} \left[ z \sum_{k=1}^{\infty} \left( \lambda^2 Y_k - \nu \frac{\partial^2 Y_k}{\partial y^2} \right) \sin \frac{k\pi x}{a} - (\varepsilon_x^{cr} + \nu \varepsilon_y^{cr}) \right];$$

$$\sigma_y = -\frac{E}{1 - \nu^2} \left[ z \left( \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) + \varepsilon_y^{cr} + \nu \varepsilon_x^{cr} \right] =$$

$$= \frac{E}{1 - \nu^2} \left[ z \left( \lambda^2 \nu Y_k - \frac{\partial^2 Y_k}{\partial y^2} \right) \sin \frac{k\pi x}{a} - (\varepsilon_y^{cr} + \nu \varepsilon_x^{cr}) \right]; \quad (21)$$

$$\tau_{xy} = -\frac{E}{2(1 + \nu)} \left( 2z \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} + \gamma_{xy}^{cr} \right) =$$

$$= -\frac{E}{2(1 + \nu)} \left( 2z \sum_{k=1}^{\infty} \left( \lambda \frac{\partial Y_k}{\partial y} \right) \cos \frac{k\pi x}{a} + \gamma_{xy}^{cr} \right).$$

По известным напряжениям вычисляются скорости роста деформаций ползучести в момент времени  $(t + \Delta t)$ , а также величины  $M_x^{cr}$ ,  $M_y^{cr}$ ,  $m^{cr}$ ,  $q_{mn}^{cr}$ .

В качестве уравнения состояния принималось нелинейное уравнение Максвелла-Гуревича, которое при плоском напряженном состоянии записывается в виде:

$$\frac{\partial \varepsilon_{ij}^{cr}}{\partial t} = \frac{f_{ij}^{cr}}{\eta^*}, \quad i = x, y, \quad j = x, y \quad (22)$$

где  $f_{ij}^{cr}$  – функция напряжений,  $\eta^*$  – релаксационная вязкость.

$$f_{ij}^{cr} = \frac{3}{2} (\sigma_{ij} - p \delta_{ij}) - E_\infty \varepsilon_{ij}^{cr}, \quad (23)$$

где  $p = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{3}$  – среднее напряжение,  $\delta_{ij}$  – символ Кронекера,  $E_\infty$  – модуль высокоэластичности.

$$\frac{1}{\eta^{cr}} = \frac{1}{\eta_0^{cr}} \exp\left(\frac{|f_{\max}^{cr}|}{m^*}\right), \quad (24)$$

где  $\eta_0^{cr}$  – начальная релаксационная вязкость,  $m^{cr}$  – модуль скорости.

Для вычисления деформаций ползучести вводится равномерная сетка по времени. Величина  $\varepsilon_{i,t+\Delta t}^*$  в момент времени  $(t + \Delta t)$  вычисляется на основе метода Эйлера [5]:

$$\frac{\partial \varepsilon_i^{cr}}{\partial t} \approx \frac{\varepsilon_{i,t+\Delta t}^{cr} - \varepsilon_{i,t}^{cr}}{\Delta t} \quad \Rightarrow \quad \varepsilon_{i,t+\Delta t}^* = \varepsilon_{i,t}^{cr} + \frac{\partial \varepsilon_i^{cr}}{\partial t} \Delta t. \quad (25)$$

Аналогичный подход для решения задач ползучести применяется в работах [3,8].

Приведем расчет прямоугольной шарнирно опертой по контуру пластинки, нагруженной равномерно распределенной нагрузкой  $q$ .

**Обсуждение результатов.** С целью контроля правильности результатов была решена задача для прямоугольной пластинки, рассмотренной в работе [2] (приводится численно-аналитическое решение задачи ползучести с использованием двойных тригонометрических рядов) и работе [9], где пластинка решалась методом конечных разностей.

Материал пластинки – вторичный ПВХ, модуль упругости  $E = 1480$  МПа, коэффициент Пуассона  $\nu = 0.3$ , величина нагрузки  $q = 2$  кПа, размеры пластины:  $a = 0.8$  м,  $b = 0.6$  м, толщина пластинки  $h = 2$  см.

Реологические параметры ПВХ при различных температурах приводятся в работах [12]. При  $T = 20^\circ\text{C}$ :  $E_\infty = 5990$  МПа,  $\eta_0^* = 9.06 \cdot 10^5$  МПа · мин,  $m^* = 12.6$  МПа.

Сравнение при различном числе членов  $s$  ряда для решений Навье при  $m, n = 1, \dots, (2s - 1)$ , Леви при  $k = 1, \dots, (2s - 1)$  и МКЭ [2] приведено в табл.1.

За эталон было принято решение, полученное в конце процесса ползучести  $w$  (Мориса – Леви,  $s = 9$ ):

$$\delta = \frac{w_i - w \text{ (Мориса – Леви, } s = 9\text{)}}{w \text{ (Мориса – Леви, } s = 9\text{)}} \cdot 100\%$$

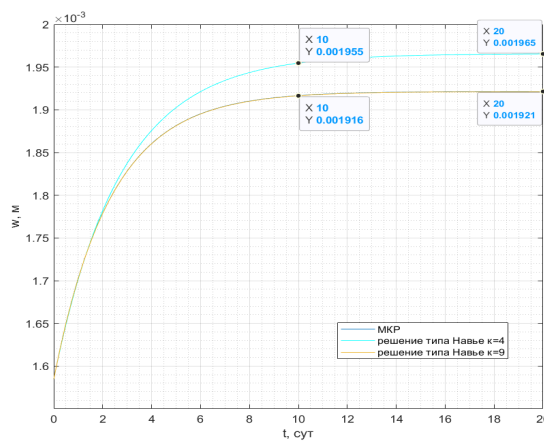
В теории упругости из выражения для удельной потенциальной энергии изменения формы, известно выражение интенсивности напряжений  $\sigma_i$ :

$$\begin{aligned} \sigma_i &= \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + \left(\sigma_y - \underbrace{\sigma_z}_{=0}\right)^2 + \left(\underbrace{\sigma_z}_{=0} - \sigma_x\right)^2 + 6\tau_{xy}^2} = \\ &= \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_x \sigma_y + 3\tau_{xy}^2} \end{aligned}$$

**Табл. 1. Сравнение прогибов в центре пластины в различные моменты времени, полученных на основе аналитического решения типа Навье, М-Леви, с решением при помощи МКР [2]**  
**Table 1. Comparison of deflections in the center of the plate at different moments in time, obtained on the basis of an analytical solution of the Navier, M-Levy type, with a solution using the MKR [2]**

| $t$ , час                         | 0      | 8      | $\delta$ , % |
|-----------------------------------|--------|--------|--------------|
| $w$ (К – Л Навье, $s = 1$ ), мм   | 1.6296 | 2.0104 | 3.612        |
| $w$ (Мориса – Леви, $s = 1$ ), мм | 1.6162 | 1.9790 | 1.994        |
| $w$ (К – Л Навье, $s = 2$ ), мм   | 1.5813 | 1.9500 | 0.500        |
| $w$ (Мориса – Леви, $s = 2$ ), мм | 1.5821 | 1.9371 | 0.164        |
| $w$ (К – Л Навье, $s = 5$ ), мм   | 1.5847 | 1.9544 | 0.727        |
| $w$ (Мориса – Леви, $s = 5$ ), мм | 1.5847 | 1.9404 | 0.005        |
| $w$ (К – Л Навье, $s = 9$ ), мм   | 1.5847 | 1.9543 | 0.721        |
| $w$ (Мориса – Леви, $s = 9$ ), мм | 1.5847 | 1.9403 | 0            |
| $w$ (МКЭ), мм                     | 1.6109 | 1.9354 | 0.253        |

На рис. 3 приведены графики роста прогиба при различном числе членов ряда  $k$ .

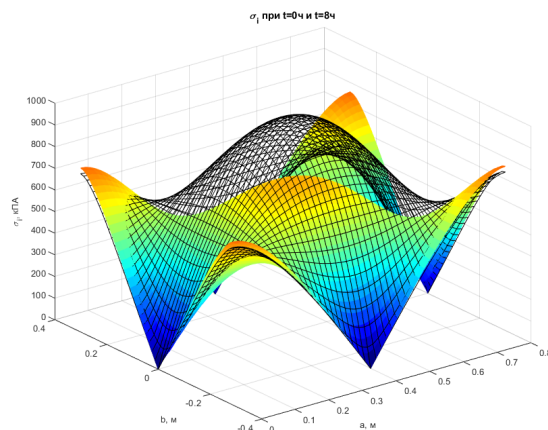
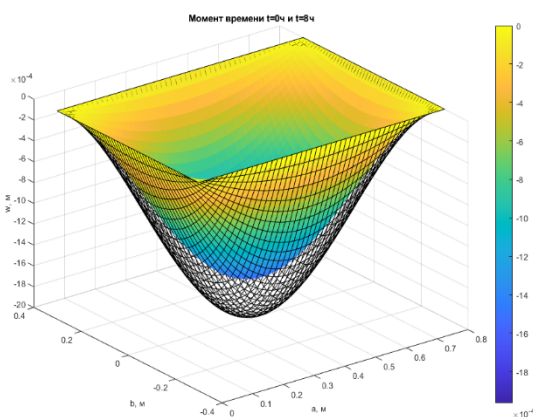


**Рис. 3 – Рост прогиба в центре пластины (решение типа Навье, Леви и МКР)**

**Fig. 3 – Increase in deflection in the center of the plate (Navier, Levy and MKR type solution)**

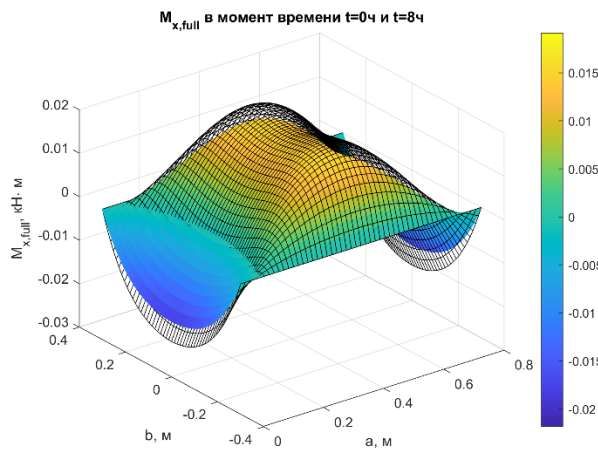
Из представленных графиков видно, что при  $k = 4$  ( $m = 1, 3$  и  $n = 1, 3$  - зеленый) и  $k = 9$  ( $m = 1, 3, 5$  и  $n = 1, 3, 5$  - зеленый пунктирный) результаты практически совпадают.

На рис. 4 и 5 приведены графики изменения интенсивности напряжения и роста прогиба с течением времени.

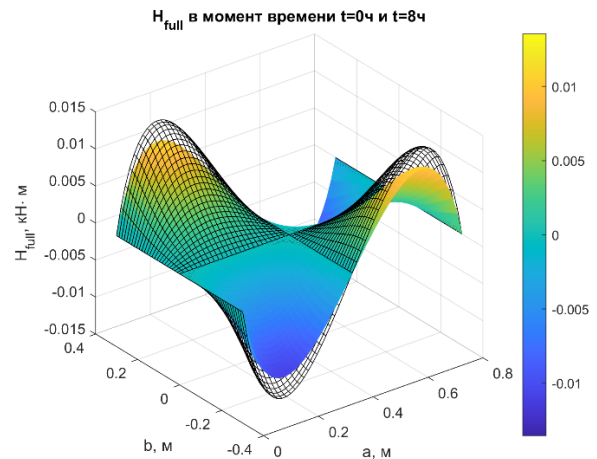


**Рис. 4 – График роста прогиба в центре пластины (решение типа М. Леви). Сетка – соответствует концу расчетного периода**  
**Fig. 4 – Graph of the growth of deflection at the center of the plate (M. Levy type solution). The grid corresponds to the end of the calculation period**

**Рис. 5 – График интенсивности напряжений (решение типа М. Леви). Сетка – соответствует концу расчетного периода**  
**Fig. 5 – Stress intensity graph (M. Levy type solution). The grid corresponds to the end of the calculation period.**



**Рис. 6 – График роста изгибающего момента в центре пластины (решение типа М. Леви). Сетка – соответствует концу расчетного периода**  
**Fig. 6 – Graph of the growth of the bending moment at the center of the plate (M. Levy-type solution). The grid corresponds to the end of the calculation period**



**Рис. 7 – График роста крутящего момента в центре пластины (решение типа М. Леви). Сетка – соответствует концу расчетного периода**  
**Fig. 7 – Graph of torque growth at the center of the plate (M. Levy type solution). The grid corresponds to the end of the calculation period.**

**Вывод.** Приведено разрешающее уравнение с учетом ползучести. Решение полученного уравнения выполнялось численно аналитическим методом на примере полимерной пластинки из вторичного ПВХ методом типа М. Леви, а интегралы, в которые входят деформации ползучести, вычисляются численно. Интегрирование по времени также выполняется численно с использованием метода Эйлера. Представлено сравнение результатов, полученных численно-аналитически и при помощи метода конечных разностей.

Установлено, что при действии на пластинку равномерно распределенной нагрузки с течением времени в ней возрастают главные напряжения. Это связано с ростом изгибающих моментов, который в свою очередь обусловлен тем, что для полимеров, подчиняющихся нелинейному уравнению Максвелла-Гуревича длительный коэффициент Пуассона всегда выше мгновенного.

Таким образом, расчет пластин только в упругой стадии приводит к заниженным значениям напряжений, и как следствие возможному ее разрушению в процессе эксплуатации.

#### Библиографический список:

1. Лукашевич А.А. Теория расчёта пластин и оболочек. СПб.: СПбГАСУ, 2017. 131 с.
2. Савченко А.А. Моделирование реологических процессов и прогнозирование прочностных характеристик пластин из полимерных и композитных материалов: //диссертация ... канд. физ.-мат. наук: 02.00.06/ – КБГУ им. Х.М. Бербекова, 2018. - 145 с.
3. Монахов В.А. Теория пластин и оболочек. Пенза: ПГУАС, 2016. 252 с.
4. Эдвардс Ч.Г., Пенни Д.Э. Дифференциальные уравнения и краевые задачи: моделирование и вычисление с помощью Mathematica, Maple и MATLAB. 3-е издание. Москва: ООО И.Д. Вильямс, 2008. 1104 с.
5. Andreev V.I., Yazyev B.M., Chepurnenko A.S. On the bending of a thin polymer plate at nonlinear creep // Advanced Materials Research. 2014. Vol. 900. pp. 707-710.
6. Самуль В.И. Основы теории упругости и пластичности. М.: Высшая школа, 1982. 264 с.
7. Andreev V.I., Chepurnenko A.S., Yazyev B.M. Energy method in the calculation stability of compressed polymer rods considering creep // Advanced Materials Research. 2014. Vol. 1004-1005. pp. 257-260.
8. Языев Б.М., Чепурненко А.С., Литвинов С.В., Козельская М.Ю. Напряженно-деформированное состояние предварительно напряженного железобетонного цилиндра с учетом ползучести бетона // Научное обозрение. 2014. № 11. С. 759-763.
9. Chepurnenko A.S., Yazyev B.M., Savchenko A.A. Calculation for the circular plate on creep considering geometric nonlinearity // Procedia Engineering. 2016. Vol. 150. pp. 1680–1685.
10. Babu Gunda J., Gandule R. New rational interpolation functions for finite element analysis of rotating beams// International Journal of Mechanical Sciences. 2008. Vol. 50. No. 3. Pp. 578-588.
11. Lou T., Xiang Y. Numerical analysis of second-order effects of externally prestressed concrete beams // Structural engineering and mechanics. 2010. v. 35. №5. P. 631-643.

12. Магомедов М.А. и др. Численно-аналитический метод в решении задачи ползучести пологой оболочки // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2025. – Т. 52. – №. 2. – С. 190-200.
13. Литвинов С.В. и др. Определение реологических параметров бетона на основе нелинейного обобщённого уравнения Максвелла-Гуревича // Вестник евразийской науки. – 2023. – Т. 15. – №. 1. – С. 55.

#### References:

1. Lukashevich, A.A. "Theory of Plate and Shell Calculations." SPb.: SPbGASU, 2017. 131 p. (In Russ)
2. Savchenko, A.A. "Modeling Rheological Processes and Predicting the Strength Characteristics of Polymer and Composite Plates." Dissertation ... Cand. Sci. (Phys. and Mathematics): 02.00.06/ – Berbekov Kabardino-Balkarian State University, 2018. 145 p. (In Russ)
3. Monakhov, V.A. "Theory of Plates and Shells." Penza: PSUAS, 2016. 252 p. (In Russ)
4. Edwards, C.G., Penny, D.E. "Differential Equations and Boundary Value Problems: Modeling and Computation Using Mathematica, Maple, and MATLAB." 3rd edition. Moscow: OOO I.D. Williams, 2008. 1104 p. (In Russ)
5. Andreev V.I., Yazyev B.M., Chepurnenko A.S. On the bending of a thin polymer plate at nonlinear creep. *Advanced Materials Research*. 2014; 900: 707-710.
6. Samul V.I. Fundamentals of the Theory of Elasticity and Plasticity. Moscow: Vysshaya Shkola, 1982:264. (In Russ)
7. Andreev V.I., Chepurnenko A.S., Yazyev B.M. Energy method in the calculation of stability of compressed polymer rods considering creep. *Advanced Materials Research*. 2014;1004-1005:257-260.
8. Yazyev B.M., Chepurnenko A.S., Litvinov S.V., Kozelskaya M.Yu. Stress-strain state of a prestressed reinforced concrete cylinder taking into account concrete creep. *Scientific Review*. 2014; 11:759-763. (In Russ)
9. Chepurnenko A.S., Yazyev B.M., Savchenko A.A. Calculation for the circular plate on creep considering geometric nonlinearity. *Procedia Engineering*. 2016;150:1680–1685.
10. Babu Gunda J., Gandule R. New rational interpolation functions for finite element analysis of rotating beams. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2008; 50(3): 578-588.
11. Lou T., Xiang Y. Numerical analysis of second-order effects of externally prestressed concrete beams. *Structural engineering and mechanics*. 2010;35(5): 631-643.
12. Magomedov M. A. et al. Numerical-analytical method for solving the creep problem of a shallow shell. *Herald of the Dagestan State Technical University. Technical sciences*. 2025;52(2):190-200. (In Russ)
13. Litvinov S. V. et al. Determination of rheological parameters of concrete based on the nonlinear generalized Maxwell-Gurevich equation. *Bulletin of Eurasian Science*. 2023;15(1): 55. (In Russ)

#### Сведения об авторах:

Волосатова Татьяна Анатольевна, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры «Высшая математика»; [kulikta@mail.ru](mailto:kulikta@mail.ru); ORCID 0000-0001-6416-0212

Мерзлякова Александра Дмитриевна, преподаватель кафедры «Системы автоматизированного проектирования»; [Merzlyakova@mail.ru](mailto:Merzlyakova@mail.ru); ORCID 0000-0001-9161-1701

Беспалов Максим Викторович, аспирант кафедры «Технологии строительства и конструкционных материалов»; [Maxim@mail.ru](mailto:Maxim@mail.ru)

Литвинов Степан Викторович, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры «Строительная механика и теория сооружений»; [litvstep@yandex.ru](mailto:litvstep@yandex.ru); ORCID 0000-0001-5729-1425

Магомедов Марсель Айдемирович, аспирант кафедры «Строительная механика»; [marsmag05@ya.ru](mailto:marsmag05@ya.ru). ORCID 0000-0001-5517-919X;

#### Information about authors:

Tatyana A. Volosatova, Cand. Sci. (Physic. and Mathemat.), Assoc. Prof., Assoc. Prof., Department of Higher Mathematics; [kulikta@mail.ru](mailto:kulikta@mail.ru); ORCID 0000-0001-6416-0212

Aleksandra D. Merzliakova, Lecturer, Department of Computer-Aided Design Systems; ORCID 0000-0001-9161-1701

Maxim V. Bepalov, Postgraduate Student, Department of Construction Technology and Structural Materials; [Maxim@mail.ru](mailto:Maxim@mail.ru)

Stepan V. Litvinov, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Prof., Department of Structural Mechanics and Theory of Structures; [litvstep@yandex.ru](mailto:litvstep@yandex.ru); ORCID 0000-0001-5729-1425

Marcel A. Magomedov, Postgraduatet, Department of Structural Mechanics; [marsmag05@ya.ru](mailto:marsmag05@ya.ru). ORCID 0000-0001-5517-919X

**Конфликт интересов/Conflict of interest.**

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

**Поступила в редакцию/ Received 05.10.2025.**

**Одобрена после рецензирования/Revised 01.11.2025.**

**Принята в печать /Accepted for publication 21.11.2025.**

**Совершенствование теплового насоса методом эффективной утилизации теплоты**  
**В.С. Губский, М.В. Шамаров**

Кубанский государственный технологический университет,  
350072, г. Краснодар, ул. Московская, д. 2, Россия

**Резюме. Цель.** Целью исследования является разработка гибридной конструкции с использованием теплового насоса и сублимационной установки для эффективного использования отработанного тепла, ее расчет, анализ параметров и теплофизических характеристик. **Метод.** Исследование основывается на методах термодинамического анализа, которые применяются для оценки технических характеристик сублимационной установки до и после внедрения теплового насоса. **Результат.** Проанализированы технические параметры теплового насоса и выбран наиболее подходящий вариант установки. Представлено два вида комбинированных схем с тепловым насосом для подогрева воды. **Вывод.** Представленные установки позволят использовать излишнее тепло для обогрева зданий и ГВС, либо уменьшить энергопотребление электродкотла. Для создания такого вида установки необходимо выполнить комплекс аналитических и экспериментальных исследований.

**Ключевые слова:** тепловой насос, сублимационная сушка, энергетическая эффективность, коэффициент преобразования, теплопроизводительность

**Для цитирования:** В.С. Губский, М.В. Шамаров. Совершенствование теплового насоса методом эффективной утилизации теплоты. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025;52(4):207-213. DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-4-207-213

**Improvement of the heat pump by the method of efficient heat utilization**

**V.S. Gubsky, M.V. Shamarov**

Kuban State Technological University,  
2 Moskovskaya Str., Krasnodar 350072, Russia

**Abstract. Objective.** A heat pump integrated into freeze-drying plants increases their energy efficiency, reduces the cost of heating buildings, stabilizes the load on the power grid and brings economic benefits. **Method.** The study is based on thermodynamic analysis methods that are used to evaluate the technical characteristics of the freeze-drying plant before and after the introduction of the heat pump. **Result.** The technical parameters of the heat pump were analyzed, and the most suitable installation option was selected. There are 2 types of combined schemes with a heat pump for water heating. **Conclusions.** The presented installations will make it possible to use excess heat for heating buildings and hot water or reduce the energy consumption of an electric boiler. To create this type of installation, it is necessary to carry out a set of analytical and experimental studies.

**Keywords:** Heat pump, freeze drying, energy efficiency, conversion ratio, heat output

**For citation:** V.S. Gubsky, M.V. Shamarov. Improvement of the heat pump by the method of efficient heat utilization. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2025;52(4):207-213. (In Russ) DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-4-207-213

**Введение.** Сублимационная сушка, также известная как лиофилизация, представляет собой один из самых чувствительных методов обезвоживания, который позволяет сохранить структуру и функциональные свойства термонестабильных материалов. Традиционные технологии сублимационной сушки отличаются высокими энергозатратами,

связанными с необходимостью поддержания глубокого вакуума и низких температур [1-5]. В последние годы ученые все больше интересуются энергоэффективными технологиями, которые позволяют сократить экономические затраты производственных процессов. Особое внимание уделяется использованию тепловых насосов в сублимационной сушке. Тепловые насосы, работающие по принципу обратного цикла Карно, позволяют эффективно переносить тепловую энергию из низкотемпературной среды в высокотемпературную. В контексте данной работы тепловые насосы могут быть использованы для следующих целей: подогрев продукта (обеспечение необходимой тепловой энергии для процесса сублимации), утилизация тепла конденсации (использование теплоты, выделяющейся при конденсации водяного пара, для подогрева теплоносителя в испарителе теплового насоса), отопление производственных помещений (отработанное тепло может быть использовано для поддержания оптимального температурного режима в производственных цехах). Преимущества использования тепловых насосов в сублимационной сушке, следующие [6-9]:

1. Повышение энергоэффективности. Значительное снижение потребления электроэнергии за счет утилизации отработанного тепла.
2. Снижение эксплуатационных затрат. Сокращение финансовых расходов на энергоносители и техническое обслуживание оборудования.
3. Повышение качества конечного продукта. Более щадящие условия сушки позволяют сохранить органолептические свойства и биологическую активность продуктов.

**Постановка задачи.** Целью данной работы является разработка гибридной конструкции с использованием теплового насоса и сублимационной установки для эффективного использования отработанного тепла, ее расчет, анализ параметров и теплофизических характеристик.

**Методы исследования.** Сублимационная сушка проходит в 3 основных этапа. Первый этап – замораживание, второй этап – сушка продукта, третий этап – окончательное досушивание продукта.

Первый этап включает в себя замораживание продукта до нужной температуры с помощью криогенных аппаратов. Важно отметить, что чем быстрее и глубже происходит этот процесс, тем меньше кристаллов образуется в продукте, что положительно сказывается на его качестве. Второй этап проводится в сублиматоре при давлении ниже 133 Па. В результате удаляется от 70 до 90% воды, что способствует сохранению питательных веществ, витаминов, вкуса, цвета, и первоначальной формы продукта. Это позволяет получить пористую структуру и минимизировать риск развития микробных, ферментативных и окислительных процессов. Остаточная вода удаляется при положительных температурах с помощью нагревателей, расположенных в том же аппарате. На этапе досушивания температура в сублиматоре варьируется в зависимости от типа продукта. Например, для сырого мяса она составляет 40–50 °С, а для варёного — 60–70 °С. Это позволяет сохранить биологически ценные компоненты продукта.

Принципиальная схема сублимационной сушки представлена на рис. 1:

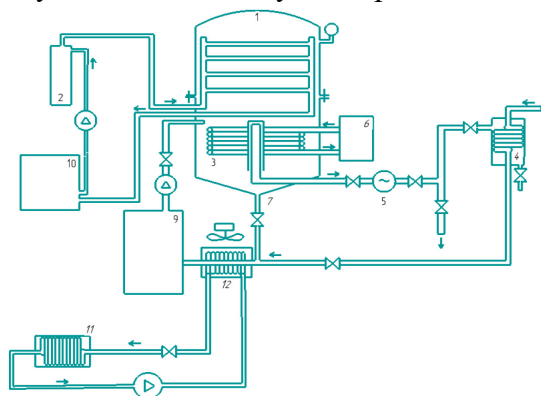
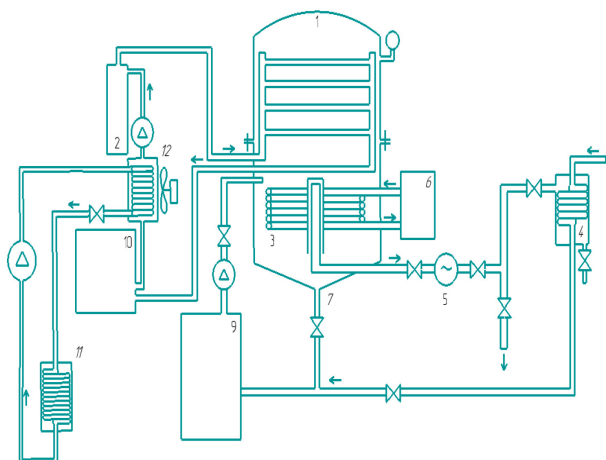


Рис. 1 – Комбинированная схема с тепловым насосом  
Fig. 1 – Combined heat pump circuit

1 – сублимационная камера, 2 – индукционный котел, 3 – десублиматор, 4 – конденсатор сублиматора, 5 – вакуумный насос, 6 – криотермостат, 7 – дренаж, 8 – подвод холодной воды, 9, 10 – емкость для горячей воды, 11 – испаритель теплового насоса, 12 – конденсатор теплового насоса.



**Рис. 2 – Комбинированная схема с тепловым насосом для догрева воды**

**Fig. 2 – Combined circuit with heat pump for water preheating**

Продукт загружают в сублимационную камеру 1. Через криостат 6 в десублиматор 3 подается хладагент с низкой температурой для конденсации пара. Затем, на этапе сушки продукта включается котел 2, который нагревает теплоноситель для нагрева полок, отработанная вода возвращается в котел через бак 10. Тепло, выделенное с поверхности продукта, откачивается насосом 5 в теплообменник 4, в котором холодная вода 8 нагревается. Горячая вода, смешиваясь с дренажной водой, дополнительно нагревается в конденсаторе теплового насоса 12 и поступает в накопительный бак 9, которая может использоваться для оттаивания десублиматора и горячего водоснабжения. [10-12].

Также на рис. 2 показано альтернативное применение теплового насоса для догрева воды, идущей в котел.



**Рис. 3 – Сублиматор серии ВСГ. Снята декоративная правая панель.**

**Колба теплоизолирована**

**Fig. 3 – HSG series sublimator. The decorative right panel was removed. The flask is thermally insulated**

Все расчеты оборудования производились по установке на рис.1. Исходные данные для расчета представлены в табл. 1.

**Таблица 1. Исходные данные**  
**Table 1. Source data**

| №  | Наименование параметра Parameter Name   | Значение Meaning |
|----|---|------------------|
| 1  | Габаритные размеры нетто ВхШхД, мм Overall net dimensions HxWxD, mm                                 | 4800x4000x6200   |
| 2  | Масса пустого, кг Empty weight, kg  | 3500             |
| 3  | Суммарная площадь полок, м <sup>2</sup> / Total shelf area, m <sup>2</sup>                          | 23,4             |
| 4  | Суммарная полезная площадь лотков, м <sup>2</sup> / Total usable tray area, m <sup>2</sup>          | 20,5             |
| 5  | Размер полки, мм/ Shelf size, mm  | 1300x1200        |
| 6  | Размер лотка, мм/ Tray size, mm   | 585x585x20       |
| 7  | Количество полок/лотков/ Number of shelves/trays  | 15/60            |
| 8  | Номинальное давление в камере сублиматора, Па/ Nominal sublimator chamber pressure, Pa              | 100              |
| 9  | Минимальное давление в камере сублиматора, Па/ Minimum sublimator chamber pressure, Pa              | 50               |
| 10 | Минимальная температура поверхности десублиматора, °C/ Minimum desublimator surface temperature, °C | -47              |
| 11 | Номинальная температура поверхности десублиматора, °C/ Nominal desublimator surface temperature, °C | -40              |
| 12 | Максимальная температура полок, °C/ Maximum shelf temperature, °C                                   | 70               |
| 13 | Продолжительность цикла сублимации, макс, ч/ Sublimation cycle duration, max, h                     | 72               |
| 14 | Максимальное электропотребление, кВт/ч/ Maximum power consumption, kW/h                             | 42               |
| 15 | Количество трубных спиралей десублиматора/ Number of desublimator coils                             | 12               |
| 16 | Количество контуров десублиматора/ Number of desublimator circuits                                  | 2                |
| 17 | Номинальное электропотребление, кВт/ч/ Nominal power consumption, kW/h                              | 18               |
| 18 | Электроснабжение/ Power supply  | 380В, 50Гц       |
| 19 | Мощность десублиматора по водяному льду, кг/ Desublimator capacity for water ice, kg/               | 200              |
| 20 | Тип используемого фреона в холодильной машине/ Type of freon used in the refrigeration unit         | R507             |
| 21 | Стандартная остаточная влажность, %/ Standard residual moisture, %                                  | 3-6              |

По данным табл. 1 получаем, что из сублиматора необходимо удалять 10 кг пара в час. Кол-во теплоты, необходимое для нагрева 200 л воды в час от 20 до 65

$$C_1 m_1 \Delta T_1 = 4200 * 200 * 50^\circ\text{C} = 42000 \text{ кДж/ч} \quad (1)$$

Кол-во теплоты, переданное паром в теплообменнике:

$$C_2 m_2 \Delta T_2 = 2100 * 10 * 80 = 1680 \text{ кДж/ч} \quad (2)$$

Отсюда следует, что необходимо еще дополнительно сообщить 40320 кДж (или 11,2 кВт/ч) тепла для нагрева воды до заданной температуры.

Площадь теплообменника сублимационной установки:

$$F = Q / (K \Delta t_{cp}) = 26,2 \text{ м}^2 \quad (3)$$

где  $Q$  - количество теплоты,  $K$  - коэффициент теплопередачи,  $\Delta t_{cp}$  - средняя разность температур между теплоносителями

Площадь конденсатора теплового насоса:

$$F = Q / (K \Delta t_{cp}) = 10 \text{ м}^2 \quad (4)$$



**Рис. 4 – Тепловой насос AirMM 3 QBKFXFC-024SRII**

**Fig. 4 – AirMM 3 QBKFXFC-024SRII heat pump**

**Таблица 2. Технические характеристики теплового насоса**

**Table 2. Heat Pump Specifications**

|  |                 |
|--|-----------------|
| Тепловая мощность, которая выделяется при работе кВт Thermal power released during operation (kW)              | 26              |
| Расход электроэнергии kW / ч Power consumption (kW/h)  | 6,1             |
| Диапазон температур в которых может работать оборудование Temperature range in which the equipment can operate | -35+45°C        |
| Обогрев Heating  | 15-60°C         |
| Охлаждение Cooling   | 5-25°C          |
| Горячая/теплая вода Hot/warm water   | 40-65°C         |
| Компрессор Compressor  | Inverter        |
| Фирма компрессора Compressor brand   | PANASONIC       |
| Источник питания Power source  | 380V/3P/50-60Hz |
| Хладагент Refrigerant  | R32             |

**Обсуждение результатов.** Тепловой насос AirMM 3 QBKFXFC-024SRII предназначен для нагрева воды, используемой в технических целях (рис. 4). Технические характеристики теплового насоса представлены в табл. 2. Его эффективность в 4 раза выше, чем у электродкотла, при потреблении 6,1 кВт/ч. Избыточная тепловая мощность позволяет нагревать значительные объемы воды.

Сейчас существует выбор между фреоном R410A и хладагентом R32 для тепловых насосов. R410A остается относительно доступным, его цена сопоставима с R22, а транспортировка, использование и хранение просты. Однако новейшим стандартом и заменой R410A является R32. R32 – это гидрофторуглеродное соединение с потенциалом глобального потепления (ПГП) 675 вместо 2088 у R410A. Однокомпонентная конструкция R32 позволяет использовать на 20% меньше хладагента, что снижает эксплуатационные расходы. Эти характеристики делают R32 предпочтительным выбором по сравнению с R410A.

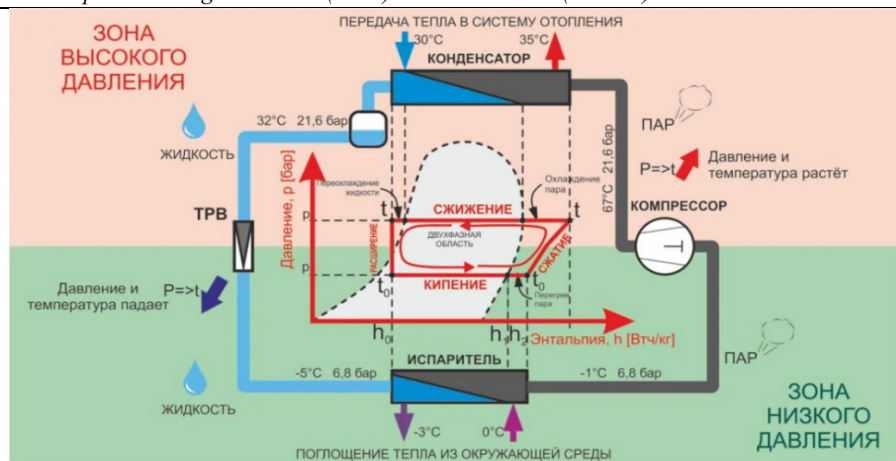


Рис. 5 – Цикл работы теплового насоса  
 Fig. 5 – Heat pump cycle

На рис. 5 представлен цикл работы теплового насоса (цикл Карно) со всеми элементами, входящими в тепловую машину. Существует три вида бивалентного режима работы теплового насоса: в бивалентном альтернативном, бивалентном вспомогательном и бивалентном комбинированном режимах тепловой насос полностью обеспечивает тепловую нагрузку до точки бивалентности.

Вспомогательный режим работы отличается тем, что при достижении этой точки тепловой насос не выключается, а продолжает функционировать вместе с дополнительным теплогенератором. Этот метод наиболее подходит для рассматриваемой установки, поскольку он позволяет поддерживать постоянный источник тепловой энергии даже при температуре наружного воздуха  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  [13-16].

**Вывод.** Использование тепловых насосов для нагрева проточной воды для технических нужд представляет собой экономически и экологически целесообразное решение. Высокая энергоэффективность, снижение эксплуатационных затрат, экологическая безопасность и универсальность делают тепловые насосы привлекательной альтернативой традиционным методам нагрева. При правильном выборе, проектировании и эксплуатации, тепловые насосы обеспечивают надежное и эффективное теплоснабжение, способствуя устойчивому развитию и снижению негативного воздействия на окружающую среду. В данный момент проводятся исследования по оптимизации работы тепловых насосов в различных условиях эксплуатации, а также разрабатываются новые технологии, направленные на повышение их эффективности и снижение стоимости.

#### Библиографический список:

1. Liu M, Tan L and Cao SL. Theoretical model of energyperformance prediction and BEP determination for-centrifugal pump as turbine. *Energy* 2019; 172:712–732.
2. Snyder G.J., LeBlanc S., Crane D. Distributed and localized cooling with thermoelectrics, [et al.] *Future energy*. 2021;5:748-751.
3. Hao Y and Tan L. Symmetrical and unsymmetrical tipclearances on cavitation performance and radial force of a mixed flow pump as turbine at pump mode. *RenewEnergy* 2018; 127: 368–376.
4. Liu YB and Tan L. Tip clearance on pressure fluctuationintensity and vortex characteristic of a mixed flow pumpas turbine at pump mode. *Renew Energy* 2018; 129:606–615.
5. Kuzichkin O.R., Vasilyev G.S., Surzhik D.I. Method for modeling dynamic modes of nonlinear control system for thermoelectric modules. *Advances in Dynamical Systems and Applications* 2020; 15(2):187-197.
6. Mardani A, Jusoh A, Zavadskas E.K, et al. Sustainableand renewable energy: an overview of the application ofmultiple criteria decision making techniques andapproaches. *Sustainability* 2015; 7: 13947–13984.
7. Бродянский В.М. Эксергетический метод термодинамического анализа. – М.: Энергия, 1973.
8. Шаргут Я., Петела Р. Эксергия. – Л.: Энергия, 1968.
9. Соколов Е.Я., Бродянский В.М. Энергетические основы трансформации тепла и процессов охлаждения. — М.: Энергоиздат, 1981.
10. Каменев В.Ф., Попов В.С. Тепловые насосы и утилизация низкопотенциального тепла. — М.: Энергоатомиздат, 1984.
11. Рекуперация тепла в системах вентиляции и кондиционирования воздуха / Под ред. В.Н. Богословского.

— М.: Стройиздат, 1990.

12. <https://bigenc.ru> (дата доступа 25.01.2025).
13. <https://molokoice.ru> (дата доступа 25.01.2025).
14. <https://propionix.ru> (дата доступа 25.01.2025).
15. Гафуров А.М. Перспективные области применения энергетических установок на низкокипящих рабочих телах. // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2015. – № 1 (25). – С. 93-98.
16. Шамаров М.В. Научно-технические достижения и перспективы института механики, робототехники, инженерии транспортных и технических систем КубГТУ в области образования и компрессоростроения/М.В. Шамаров, А.В. Гукасян, Ю.С. Беззаботов, И.Е. Сязин // В сборнике: Эффективное применение в проектах компрессорного, газоразделительного и энергосберегающего оборудования. Сборник трудов III-й научно-технической конференции. Краснодар, 2021. С. 53-57.

#### References:

1. Liu M, Tan L and Cao SL. Theoretical model of energy performance prediction and BEP determination for centrifugal pump as turbine. *Energy* 2019; 172:712–732.
2. Snyder G.J., LeBlanc S., Crane D. Distributed and localized cooling with thermoelectrics, [et al.] *Future energy*. 2021; 5:748-751.
3. Hao Y and Tan L. Symmetrical and unsymmetrical tip clearances on cavitation performance and radial force of a mixed flow pump as turbine at pump mode. *Renew Energy*. 2018;127: 368–376.
4. Liu YB and Tan L. Tip clearance on pressure fluctuation intensity and vortex characteristic of a mixed flow pump as turbine at pump mode. *Renew Energy* 2018; 129:606–615.
5. Kuzichkin O.R., Vasilyev G.S., Surzhik D.I. Method for modeling dynamic modes of nonlinear control system for thermoelectric modules. *Advances in Dynamical Systems and Applications* 2020; 15(2):187-197. (In Russ)
6. Mardani A, Jusoh A, Zavadskas E.K, et al. Sustainable and renewable energy: an overview of the application of multiple criteria decision making techniques and approaches. *Sustainability* 2015;7:13947–13984.
7. Brodyansky V. M. Exergetic method of thermodynamic analysis. - М.: Energy, 1973. (In Russ)
8. Shargut Ya, Petela R. Exergia. - L.: Energy, 1968. (In Russ)
9. Sokolov E.Ya., Brodyansky V.M. Energy fundamentals of heat transformation and cooling processes. - М.: Energoizdat, 1981. (In Russ)
10. Kamenev V.F., Popov V.S. Heat pumps and utilization of low-grade heat. - М.: Energoatomizdat, 1984. (In Russ)
11. Heat recovery in ventilation and air conditioning systems/Ed. V.N. Bogoslovsky. - М.: Stroyizdat, 1990. (In Russ)
12. <https://bigenc.ru> (access date 25.01.2025).
13. <https://molokoice.ru> (access date 25.01.2025).
14. <https://propionix.ru> (access date 25.01.2025).
15. Gafurov A.M. Promising areas of application of power plants on low-boiling working bodies. *Bulletin of Kazan State Energy University*. 2015;1(25): 93-98. (In Russ)
16. Shamarov M.V. Scientific and technical achievements and prospects of the Institute of Mechanics, Robotics, Engineering of Transport and Technical Systems of KubSTU in the field of education and compressor engineering/M.V. Shamarov, A.V. Gukasyan, Yu.S. Carelessness, I.E. Syazin//In the collection: Effective application in compressor, gas separation and energy-saving equipment. Collection of works of the III scientific and technical conference. Krasnodar, 2021:53-57. (In Russ)

#### Сведения об авторах:

Губский Владислав Сергеевич, аспирант, кафедра технологического оборудования и систем жизнеобеспечения; [vladislavvg@gmail.com](mailto:vladislavvg@gmail.com)

Шамаров Максим Владимирович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологического оборудования и систем жизнеобеспечения; [schmax@mail.ru](mailto:schmax@mail.ru); ORCID 0000-0001-7520-8621

#### Information about authors:

Vladislav S. Gubskiy, Graduate Student, Department of Technological Equipment and Life Support Systems; [vladislavvg@gmail.com](mailto:vladislavvg@gmail.com)

Maxim V. Shamarov, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Assoc. Prof., Department of Technological Equipment and Life Support Systems; [schmax@mail.ru](mailto:schmax@mail.ru); ORCID 0000-0001-7520-8621

#### Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 08.09.2025.

Одобрена после рецензирования/Revised 30.10.2025.

Принята в печать/Accepted for publication 05.11.2025.

**Разработка цифровых инструментов для расчета энергопотребления жилых зданий:  
отопление и горячее водоснабжение**

**Д.Ф. Карпов<sup>1</sup>, М.В. Павлов<sup>1</sup>, Е.В. Абрамова<sup>2,3</sup>, В.К. Заикин<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>Вологодский государственный университет,

<sup>1</sup>160000, г. Вологда, ул. Ленина, 15, Россия,

<sup>2</sup>Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана  
(национальный исследовательский институт),

<sup>2</sup>105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, Россия,

<sup>3</sup>Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии  
архитектуры и строительных наук,

<sup>3</sup>127238, г. Москва, Локомотивный пр., 21, Россия,

<sup>4</sup>Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет,

<sup>4</sup>190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., 4, Россия

**Резюме. Цель.** Целью исследования является создание программных средств, обеспечивающих достоверное и устойчиво воспроизводимое определение тепловых нагрузок и годовых затрат тепловой энергии с учетом совокупного влияния климатических, строительных и эксплуатационных условий. **Метод.** Методологической основой исследования является структурирование вычислительного процесса в виде последовательных функциональных блоков, реализующих алгоритмы расчета тепловых нагрузок и годового энергопотребления. Исходными данными являются строительные характеристики зданий, численность жителей, а также климатические и эксплуатационные параметры. **Результат.** Разработаны два программных модуля для расчета энергопотребления систем отопления и горячего водоснабжения. Новизной исследования являются разработка концепции специализированного программного обеспечения, предназначенного для реализации алгоритмов вычисления тепловых нагрузок и годового энергопотребления, а также создание метода автоматизированного расчета параметров систем отопления и горячего водоснабжения с применением укрупненных расчетных показателей. Тестирование программ подтвердило корректность алгоритмов и применимость разработанных решений в инженерной практике. Представленные алгоритмы реализованы в программных модулях, апробированных на примерах гражданских зданий. **Вывод.** Разработанные программы реализуют автоматизацию расчетов энергопотребления жилых зданий и позволяют учитывать ключевые климатические, строительные и эксплуатационные параметры. Представленные алгоритмы вычисляют максимальные и средние тепловые нагрузки, а также годовой расход энергии для систем отопления и горячего водоснабжения. Верификация программных модулей продемонстрировала высокую точность и устойчивость расчетных результатов. Проведенное исследование подтверждает значимость цифровых инструментов в сфере энергоэффективности и устойчивого развития жилой застройки.

**Ключевые слова:** энергоэффективность, энергопотребление, тепловая нагрузка, годовой расход, отопление, горячее водоснабжение, жилое здание, программное обеспечение, цифровой инструмент, алгоритм

**Для цитирования:** Д.Ф. Карпов, М.В. Павлов, Е.В. Абрамова, В.К. Заикин. Разработка цифровых инструментов для расчета энергопотребления жилых зданий: отопление и горячее водоснабжение. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025;52(4):214-224. DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-4-214-224

## **Development of digital tools for calculating the energy consumption of residential buildings: heating and domestic hot water**

**D.F. Karpov<sup>1</sup>, M.V. Pavlov<sup>1</sup>, E.V. Abramova<sup>2,3</sup>, V.K. Zaikin<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>Vologda State University,

<sup>1</sup>15 Lenin St., Vologda, 160000, Russia,

<sup>2</sup>Bauman Moscow State Technical University (National Research Institute),

<sup>2</sup>5 2nd Baumanskaya Str., Moscow, 105005, Russia,

<sup>3</sup>Research Institute of Building Physics

of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences,

<sup>3</sup>21 Locomotive Str., Moscow 127238, Russia,

<sup>4</sup>Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering,

<sup>4</sup>4, 2nd Krasnoarmeiskaya Str., Saint Petersburg 190005, Russia

**Abstract. Objective.** The aim of the study is to create software tools that ensure reliable and consistently reproducible determination of heat loads and annual thermal energy consumption, taking into account the combined influence of climatic, structural, and operational factors. **Method.** The methodological basis of the study involves structuring the computational process into a sequence of functional blocks implementing algorithms for calculating heat loads and annual energy consumption. The input data include the architectural and construction characteristics of buildings, the number of occupants, as well as climatic and operational parameters. The proposed algorithms are implemented in software modules tested on examples of civil buildings. **Result.** Two software modules have been developed for calculating the energy consumption of heating and domestic hot water systems. The novelty of the study lies in the development of a concept for specialized software implementing algorithms for calculating heat loads and annual energy consumption, as well as in the creation of an automated method for determining the parameters of heating and hot water supply systems using aggregated calculation indicators. Software testing confirmed the correctness of the algorithms and the applicability of the developed solutions in engineering practice. **Conclusion.** The developed software implements the automation of energy consumption calculations for residential buildings and enables consideration of key climatic, construction, and operational parameters. The presented algorithms determine peak and average heat loads as well as the annual energy demand for heating and domestic hot water systems. The obtained results demonstrate the efficiency of the software for optimizing energy consumption calculations. Verification of the software modules demonstrated high accuracy and stability of the computational results. The conducted study confirms the importance of digital tools in enhancing energy efficiency and promoting sustainable development in residential construction.

**Keywords:** energy efficiency, energy consumption, heat load, annual consumption, heating, domestic hot water, residential building, software, digital tool, algorithm

**For citation:** D.F. Karpov, M.V. Pavlov, E.V. Abramova, V.K. Zaikin. Development of digital tools for calculating the energy consumption of residential buildings: heating and domestic hot water. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2025;52(4):214-224. (In Russ) DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-4-214-224

**Введение.** Актуальные направления развития теплоснабжения и повышения энергоэффективности жилых зданий требуют внедрения цифровых инструментов, обеспечивающих оптимизацию проектирования, эксплуатации и анализа инженерных систем [1-3]. Ключевое значение в этом контексте имеют методы расчета тепловых нагрузок и годового энергопотребления, которые формируют основу для стратегий энергосбережения и устойчивого развития [4].

Увеличение требований к экологической безопасности и рациональному использованию ресурсов обуславливает необходимость создания специализированного программного обеспечения для автоматизации расчетов тепловой энергии [5]. Расчет тепловых нагрузок на отопление и горячее водоснабжение жилых зданий является фундаментальной

задачей проектирования и эксплуатации систем теплоснабжения, обеспечивая точность определения параметров энергообеспечения и соответствие нормативным требованиям [6-9]. Разработка и внедрение программных решений для автоматизированного вычисления тепловых нагрузок и годового энергопотребления повышает эффективность инженерных расчетов, их оперативность и надежность [10].

Проблема исследования охватывает методы расчета энергопотребления жилых зданий, анализ факторов, влияющих на энергоэффективность инженерных систем, и оценку эксплуатационных характеристик зданий [11-26]. Анализ источников [11-18] показывает, что в большинстве исследований отсутствуют специализированные цифровые инструменты для комплексного расчета энергопотребления, что ограничивает практическую применимость предложенных методов отопления. Недостаточно количественно оценено влияние модернизационных мероприятий на энергопотребление, тепловой комфорт и долговременную надежность систем [15-17], а также ограничена разработка программ для комплексной оценки технологических, эксплуатационных и экономических показателей модернизации [12, 18].

Оценка публикаций, посвященных расходу тепловой энергии на горячее водоснабжение жилых зданий [19-26], подтверждает, что существующие методы недостаточно поддерживаются цифровыми инструментами для оперативного планирования энергосберегающих мероприятий и анализа их практических последствий. Отсутствует количественный анализ влияния поведенческих факторов жильцов, сезонных колебаний и вариативности нагрузки на точность прогнозирования потребления и долговременную эксплуатационную надежность систем [22-25]. Также ограничена разработка цифровых платформ для оценки эффективности, экономической целесообразности и устойчивости энергосбережения при реализации различных стратегий снижения энергопотребления [20, 21, 26].

**Постановка задачи.** Существующие тенденции в решении вопросов повышения энергоэффективности гражданских зданий требуют разработки прикладных программных средств для расчета энергопотребления системами отопления и горячего водоснабжения, что позволяет оптимизировать эксплуатацию и управление инженерными системами [27, 28]. Применяемые концепции включают моделирование тепловых нагрузок, анализ нормативных требований и фактического потребления, а также внедрение технологий повышения эффективности, таких как рекуперация теплоты и интеллектуальное предиктивное управление [29-31].

Цель исследования – разработать и апробировать специализированные программные продукты для расчета энергопотребления жилых зданий на отопление и горячее водоснабжение с учетом укрупненных показателей и параметров эксплуатации.

Для достижения цели исследования требуется:

1. Разработать структуру программных модулей, обеспечивающих ввод исходных данных, автоматическую обработку информации и получение результатов расчетов тепловых нагрузок и годового энергопотребления.
2. Реализовать алгоритмы вычисления максимальных и средних тепловых нагрузок, а также годового расхода тепловой энергии для отопления и горячего водоснабжения жилых зданий.
3. Выполнить тестирование созданных программ и оценить их возможности для практического применения в строительстве и теплоэнергетике при расчетах энергопотребления жилых зданий.

Объект исследования – процессы расчета тепловых нагрузок и энергопотребления жилых зданий в системах отопления и горячего водоснабжения.

Предмет исследования – методы и алгоритмы специализированного программного обеспечения, реализующего автоматизацию вычислений тепловых потоков, нагрузок и годового расхода тепловой энергии.

**Методы исследования.** Методологической базой исследования является применение вычислительных методов для автоматизированного определения тепловых нагрузок

и годового расхода тепловой энергии жилых зданий. Используются данные о строительных параметрах жилых зданий, численности жильцов, климатических и эксплуатационных условиях. Основным инструментом является разрабатываемое прикладное программное обеспечение для расчета энергопотребления на отопление и горячее водоснабжение.

Методика исследования включает структурирование алгоритмов расчета в виде отдельных функциональных блоков, обеспечивающих поэтапное преобразование исходных данных в результаты. Для оценки тепловых нагрузок применяются укрупненные показатели, позволяющие учитывать как средние, так и максимальные режимы работы инженерных систем. Расчет годового расхода тепловой энергии основан на моделировании эксплуатационных режимов систем отопления и горячего водоснабжения с учетом сезонных и региональных факторов. Верификация корректности алгоритмов осуществляется сопоставлением полученных результатов с традиционными инженерными методами расчета.

Структура программного расчета расходов тепловой энергии на отопление жилого здания: вычисление расчетных тепловых нагрузок и годового потребления тепловой энергии для поддержания нормативных параметров микроклимата в помещениях жилого здания в отопительный период.

Структура программного расчета расходов тепловой энергии на горячее водоснабжение жилого здания: реализация алгоритмов определения расчетных тепловых нагрузок и годового потребления тепловой энергии, необходимых для горячего водоснабжения жилого здания с учетом климатических, эксплуатационных и водопотребляющих характеристик. Языком программирования разработанных цифровых продуктов является Visual Basic for Applications, а средой реализации – Microsoft Excel.

Табл. 1 содержит ключевые этапы работы, характеризующие методологию, методы и материалы исследования.

**Таблица 1. Основные этапы программного расчета тепловых нагрузок и энергопотребления жилых зданий на отопление и горячее водоснабжение**  
**Table 1. Main stages of software-based calculation of heat loads and energy consumption of residential buildings for heating and domestic hot water supply**

| №  | Наименование этапа работы<br>Stage title   | Краткое описание этапа работы<br>Brief description of the work stage   |
|----|--|--|
| 1. | Ввод исходных данных.<br>Input of initial data.  | Пользователь вводит ключевые параметры здания или жилого комплекса. Для первой программы (система отопления) это строительный объем отапливаемой части и параметры наружного воздуха. Для второй (система горячего водоснабжения) – количество жителей, температура холодной воды и коэффициенты тепловых потерь.                          |
| 2. | Проверка корректности данных. Data validation.   | Программы автоматически проверяют введенные данные на полноту и соответствие допустимым диапазонам. Все ошибки или пропущенные значения автоматически выявляются и отображаются. Это обеспечивает надежность последующих расчетов.   |
| 3. | Расчет средних параметров.<br>Calculation of average parameters.                                       | Для системы отопления программа вычисляет усредненную температуру внутреннего воздуха и удельную отопительную характеристику здания. Для системы горячего водоснабжения программа определяет средний часовой расход воды и коэффициент часовой неравномерности потребления. Параметры применяются для построения модели тепловых нагрузок. |
| 4. | Определение максимальных и средних тепловых нагрузок. Determination of maximum and average heat loads. | Программы рассчитывают максимальные и средние тепловые нагрузки здания в кДж/ч или ккал/ч. Расчеты учитывают как средние режимы работы, так и экстремальные (пиковые) нагрузки. Это позволяет оценить энергетическую нагрузку на систему отопления или горячего водоснабжения.   |
| 5. | Формирование годового расхода энергии.<br>Calculation of annual energy consumption.                    | На основе рассчитанных нагрузок программы вычисляют годовой расход тепловой энергии в ГДж или Гкал. Для отопления учитывается продолжительность отопительного периода и режим работы системы. Для горячего водоснабжения учитываются сезонные изменения потребления и климатические особенности региона строительства.                     |

**Обсуждение результатов.** Разработаны и проанализированы два функциональных программных модуля, реализующие алгоритмы определения расчетных тепловых нагрузок

и годового потребления тепловой энергии для систем отопления и горячего водоснабжения с учетом строительного объема отапливаемой части здания, численности жителей, климатических условий региона и эксплуатационных режимов инженерных систем. Программы выполняют последовательное преобразование исходных данных в расчетные показатели через структурированные функциональные блоки и обеспечивают высокую точность вычислений.

Представим краткое описание функциональных возможностей разработанных модулей и результаты их компьютерной реализации, подтверждающие практическую эффективность предложенных решений.

1. Программа для расчета расходов тепловой энергии на нужды отопления жилого здания позволяет определять максимальные и средние тепловые нагрузки, а также годовое потребление тепловой энергии, при этом реализованный алгоритм на основе известного строительного объема отапливаемой части здания и климатических характеристик региона определяет требуемые тепловые потоки для функционирования системы отопления [32].

Функциональное назначение блоков программы:

Блок 1 обеспечивает ввод исходных данных: строительный объем отапливаемой части здания, параметры наружного воздуха и продолжительность отопительного периода.

Блок 2 автоматически определяет усредненную температуру внутреннего воздуха, рассчитывает удельную отопительную характеристику здания и вычисляет максимальную и среднюю тепловые нагрузки.

Блок 3 формирует годовой расход тепловой энергии с учетом продолжительности отопительного периода и режима работы системы отопления.

Табл. 2 содержит код разработанного программного обеспечения.

**Таблица 2. Код программы для расчета расходов тепловой энергии на отопление жилого здания**  
**Table 2. Program code for calculating heat energy consumption for residential building heating**

|  |   |
|--|---|
| № п/п: 'A2'. No.: 'A2'.  |   |
| Наименование величины: 'B2'.Quantity name: 'B2'.   |   |
| Условное обозначение: 'G2'.Symbol: 'G2'.   |   |
| Значение: 'H2'.Value: 'H2'.  |   |
| Единица измерения: 'I2'.Unit of measurement: 'I2'.   |   |
| <b>Блок 1. Исходные данные: 'A3'. Block 1. Input data: 'A3'.</b>   |   |
| 1.   | Строительный объем отапливаемой части жилого здания: 'B4': 'H4'.  |
| 2.   | Расчетная температура наружного воздуха: 'B5': 'H5'.  |
| 3.   | Средняя температура наружного воздуха за отопительный период: 'B6': 'H6'.   |
| 4.   | Продолжительность отопительного периода: 'B7': 'H7'.  |
| <b>Блок 2. Расчетные расходы тепловой энергии (тепловые нагрузки): 'A8'. Block 2. Calculated heat energy consumption (heat loads): 'A8'.</b> |   |
| 1.   | Усредненная температура внутреннего воздуха: 'B9': 'H9', 'ЕСЛИ(H5>=-30;18;20)'.   |
| 2.   | Удельная отопительная характеристика жилого здания: 'B10': 'H10', '5,5/(H4^0,125)' [кДж/(м <sup>3</sup> ·ч·°C)]; 'H11', 'H10/4,187' [ккал/(м <sup>3</sup> ·ч·°C)].                            |
| 3.   | Расчетная (максимальная) тепловая нагрузка на нужды отопления жилого здания: 'B12': 'H12', '=ОКРВВЕРХ((1+0,05)*(1,3+0,01*H5)*H10*H4*(H9-H5);10)' [кДж/ч]; 'H13', 'H12/(4,187*10^6)' [Гкал/ч]. |
| 4.   | Средняя тепловая нагрузка на нужды отопления жилого здания: 'B14': 'H14', 'ОКРВВЕРХ(H12*((H9-H6)/(H9-H5));10)' [кДж/ч]; 'H15', 'H14/(4,187*10^6)' [Гкал/ч].                                   |
| <b>Блок 3. Годовой расход тепловой энергии: 'A16'. Block 3. Annual heat energy consumption: 'A16'.</b>                                       |   |
| 1.   | Годовой расход тепловой энергии на нужды отопления жилого здания: 'B17': 'H17', 'H14*H7*24*10^-6' [ГДж]; 'H18', 'H17/4,187' [Гкал].   |
| 2.   | Гидравлический напор смесительного насоса: 'B17': 'H17', 'H9+2,5'.  |

Рис. 1 демонстрирует пример автоматизированного программного расчета расходов тепловой энергии на отопление жилого здания.

|    | A  | B   | C | D | E | F                    | G        | H  | I |
|----|--|---|---|---|---|----------------------|----------|--|---|
| 2  | № п/п  | Наименование величины   |   |   |   | Условное обозначение | Значение | Единица измерения  |   |
| 3  | Блок 1. Исходные данные  |   |   |   |   |                      |          |  |   |
| 4  | 1.   | Строительный объем отапливаемой части жилого здания                         |   |   |   | $V$                  | 6400     | $\text{м}^3$   |   |
| 5  | 2.   | Расчетная температура наружного воздуха                                     |   |   |   | $t_{н.р}$            | -32      | $^{\circ}\text{C}$   |   |
| 6  | 3.   | Средняя температура наружного воздуха за отопительный период                |   |   |   | $t_{н.ср}$           | -4,0     | $^{\circ}\text{C}$   |   |
| 7  | 4.   | Продолжительность отопительного периода                                     |   |   |   | $n_{о.с}$            | 228      | сут/год  |   |
| 8  | Блок 2. Расчетные расходы тепловой энергии (тепловые нагрузки) |   |   |   |   |                      |          |  |   |
| 9  | 1.   | Усредненная температура внутреннего воздуха                                 |   |   |   | $t_{вн}$             | 20       | $^{\circ}\text{C}$   |   |
| 10 | 2.   | Удельная отопительная характеристика жилого здания                          |   |   |   | $q_o$                | 1,839    | $\text{кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{ч} \cdot ^{\circ}\text{C})$  |   |
| 11 |  |   |   |   |   |                      | 0,439    | $\text{ккал}/(\text{м}^3 \cdot \text{ч} \cdot ^{\circ}\text{C})$ |   |
| 12 | 3.   | Расчетная (максимальная) тепловая нагрузка на нужды отопления жилого здания |   |   |   | $Q_{о,макс}$         | 629790   | $\text{кДж}/\text{ч}$  |   |
| 13 |  |   |   |   |   |                      | 0,150    | $\text{Гкал}/\text{ч}$   |   |
| 14 | 4.   | Средняя тепловая нагрузка на нужды отопления жилого здания                  |   |   |   | $Q_{о,ср}$           | 290680   | $\text{кДж}/\text{ч}$  |   |
| 15 |  |   |   |   |   |                      | 0,069    | $\text{Гкал}/\text{ч}$   |   |
| 16 | Блок 3. Годовой расход тепловой энергии                        |   |   |   |   |                      |          |  |   |
| 17 | 1.   | Годовой расход тепловой энергии на нужды отопления жилого здания            |   |   |   | $\Delta Q_{о,год}$   | 1590,6   | $\text{ГДж}$   |   |
| 18 |  |   |   |   |   |                      | 379,9    | $\text{Гкал}$  |   |

Рис. 1 – Результаты расчета расходов тепловой энергии на отопление жилого здания

Fig. 1 – Results of heat energy consumption calculation for residential building heating

2. Программа расчета расходов тепловой энергии на нужды горячего водоснабжения жилого здания позволяет определять максимальные и средние тепловые нагрузки и годовой расход тепловой энергии. Методика расчета на основе данных о численности проживающих, температуре холодной водопроводной воды и климатических характеристиках региона обеспечивает определение тепловых потоков для системы горячего водоснабжения типового жилого здания, оборудованного ваннами длиной 1500-1700 мм и душевыми кабинами [33]. Табл.3 содержит код разработанного программного обеспечения.

Таблица 3. Код программы для расчета расходов тепловой энергии на горячее водоснабжение жилого здания

Table 3. Program code for calculating heat energy consumption for domestic hot water supply in a residential building

|   |   |
|---|---|
| № п/п: 'A2'. No.: 'A2'.   |   |
| Наименование величины: 'B2'.Quantity name: 'B2'.  |   |
| Условное обозначение: 'G2'.Symbol: 'G2'.  |   |
| Значение: 'H2'.Value: 'H2'.   |   |
| Единица измерения: 'I2'.Unit of measurement: 'I2'.  |   |
| Блок 1. Исходные данные: 'A3'. Block 1. Initial data: 'A3'.                               |   |
| 1.  | Расчетное количество жителей в жилом здании: 'B4': 'H4'.  |
| 2.  | Средняя температура холодной водопроводной воды за отопительный период года: 'B5': 'H5'.  |
| 3.  | Средняя температура холодной водопроводной воды в теплый период года: 'B6': 'H6'.   |
| 4.  | Коэффициент, учитывающий потери теплоты трубопроводами системы горячего водоснабжения: 'B7': 'H7'.  |
| 5.  | Коэффициент снижения потребления горячей водопроводной воды в теплый период года: 'B8': 'H8'.   |
| 6.  | Продолжительность отопительного периода: 'B9': 'H9'.  |
| Блок 2. Часовые расходы тепловой энергии: 'A10'. Block 2. Hourly heat consumption: 'A10'. |   |
| 1.  | Средний часовой расход горячей водопроводной воды за сутки максимального водопотребления: 'B11': 'H11', '(1/24)*985,73*120*H4*10 <sup>-6</sup> '.   |
| 2.  | Коэффициент часовой неравномерности потребления горячей водопроводной воды: 'B12': 'H12', '120*(10/105)*(0,2+0,6/((H4*10/200) <sup>0,5</sup> +0,18/(H4*10/200)))'.  |
| 3.  | Максимальный часовой расход тепловой энергии на нужды горячего водоснабжения жилого здания: 'B13': 'H13', 'ОКРВВЕРХ(4187*(H12*H11+H11*H7)*(55-H5);10)' [кДж/ч]; 'H14', 'H13/(4,187*10 <sup>6</sup> )' [Гкал/ч]. |
| 4.  | Средний часовой расход тепловой энергии на нужды горячего водоснабжения жилого здания: 'B15': 'H15', 'ОКРВВЕРХ(4187*H11*(55-H5)*(1+H7);10)' [кДж/ч]; 'H16', 'H15/(4,187*10 <sup>6</sup> )' [Гкал/ч].            |
| Блок 3. Годовой расход тепловой энергии: 'A17'. Block 3. Annual heat consumption: 'A17'.  |   |
| 1.  | Годовой расход тепловой энергии на нужды горячего водоснабжения жилого здания: 'B18': 'H18', 'H15*(H9+H8*(55-H6)/(55-H5))*(350-H9))*24*10 <sup>-6</sup> ' [ГДж]; 'H19', 'H18/4,187' [Гкал].                     |

Функциональное назначение блоков программы: Блок 1 обеспечивает ввод исходных данных: количество потребителей, температуру холодной воды, тепловые потери и продолжительность отопительного периода. Блок 2 автоматически определяет средний часовой расход горячей воды, коэффициент неравномерности потребления, максимальную и среднюю тепловые нагрузки. Блок 3 формирует годовой расход тепловой энергии с учетом сезонного режима работы системы горячего водоснабжения и климатических условий региона. Рис. 2 демонстрирует пример автоматизированного программного расчета расходов тепловой энергии на горячее водоснабжение жилого здания.

|    | A  | B  | C | D | E | F | G                    | H        | I                 |  |
|----|--|--|---|---|---|---|----------------------|----------|-------------------|--|
| 2  | № п/п                                    | Наименование величины  |   |   |   |   | Условное обозначение | Значение | Единица измерения |  |
| 3  | Блок 1. Исходные данные                  |  |   |   |   |   |                      |          |                   |  |
| 4  | 1.                                       | Расчетное количество жителей в жилом здании  |   |   |   |   | $m$                  | 90       | –                 |  |
| 5  | 2.                                       | Средняя температура холодной водопроводной воды за отопительный период года                |   |   |   |   | $t_x$                | 5        | °С                |  |
| 6  | 3.                                       | Средняя температура холодной водопроводной воды в теплый период года                       |   |   |   |   | $t_n$                | 15       | °С                |  |
| 7  | 4.                                       | Коэффициент, учитывающий потери теплоты трубопроводами системы горячего водоснабжения      |   |   |   |   | $k_{тп}$             | 0,3      | –                 |  |
| 8  | 5.                                       | Коэффициент снижения потребления горячей водопроводной воды в теплый период года           |   |   |   |   | $\phi_n$             | 0,8      | –                 |  |
| 9  | 6.                                       | Продолжительность отопительного периода  |   |   |   |   | $n_{о.с}$            | 228      | сут/год           |  |
| 10 | Блок 2. Часовые расходы тепловой энергии |  |   |   |   |   |                      |          |                   |  |
| 11 | 1.                                       | Средний часовой расход горячей водопроводной воды за сутки максимального водопотребления   |   |   |   |   | $G_{гвс}$            | 0,44     | т/ч               |  |
| 12 | 2.                                       | Коэффициент часовой неравномерности потребления горячей водопроводной воды                 |   |   |   |   | $k_{ч}$              | 5,98     | –                 |  |
| 13 | 3.                                       | Максимальный часовой расход тепловой энергии на нужды горячего водоснабжения жилого здания |   |   |   |   | $Q_{макс}$           | 582750   | кДж/ч             |  |
| 14 |  |  |   |   |   |   |                      | 0,139    | Гкал/ч            |  |
| 15 | 4.                                       | Средний часовой расход тепловой энергии на нужды горячего водоснабжения жилого здания      |   |   |   |   | $Q_{ср}$             | 120730   | кДж/ч             |  |
| 16 |  |  |   |   |   |   |                      | 0,029    | Гкал/ч            |  |
| 17 | Блок 3. Годовой расход тепловой энергии  |  |   |   |   |   |                      |          |                   |  |
| 18 | 1.                                       | Годовой расход тепловой энергии на нужды горячего водоснабжения жилого здания              |   |   |   |   | $\Delta Q_{год}$     | 886,9    | ГДж               |  |
| 19 |  |  |   |   |   |   |                      | 211,8    | Гкал              |  |

Рис. 2 – Результаты расчета расходов тепловой энергии на горячее водоснабжение жилого здания  
 Fig. 2 – Results of heat energy consumption calculation for domestic hot water supply in a residential building

Разработанное программное обеспечение структурирует вычислительный процесс в функциональные блоки, поддерживая полноту и точность расчетов. Первая программа ориентирована на определение тепловых нагрузок и годового расхода энергии, необходимых для отопления жилых зданий, с учетом их строительного объема и климатических характеристик региона. Вторая программа предназначена для вычисления тепловых потоков и энергопотребления на горячее водоснабжение жилых зданий, исходя из численности потребителей и режимов эксплуатации инженерных систем. Программы позволяют проводить расчеты с высокой степенью автоматизации, минимизируя вероятность ошибок и повышая воспроизводимость результатов. Внедрение данных цифровых решений способствует развитию современных подходов к управлению энергопотреблением и созданию более энергоэффективной и устойчивой городской инфраструктуры.

**Вывод.** Проведенное исследование позволило разработать и апробировать цифровые инструменты в виде прикладных программ, ориентированных на автоматизацию расчетов тепловых нагрузок и годового энергопотребления жилых зданий для систем отопления и горячего водоснабжения. На основе структурированного алгоритмического подхода обеспечены высокая точность вычислений, воспроизводимость результатов и удобство практического применения цифровых продуктов в инженерной деятельности.

Основные результаты работы:

1. Созданы два программных модуля, позволяющих рассчитывать тепловые нагрузки и годовое энергопотребление для систем отопления и горячего водоснабжения жилых зданий.

2. Реализованы алгоритмы вычисления максимальных и средних тепловых нагрузок, а также годового расхода энергии с учетом климатических условий, строительных параметров и эксплуатационных факторов.

3. Выполнена проверка программного обеспечения, подтвердившая его корректность и возможность применения в практике проектирования и эксплуатации систем теплоснабжения.

Разработанные программные модули обеспечивают автоматизацию расчетов, учитывающих строительные параметры, климатические условия и эксплуатационные режимы, что позволяет получать достоверные результаты с высокой степенью воспроизводимости. Проведенная апробация показала эффективность предложенных решений и их применимость в инженерной практике для оптимизации работы систем теплового обеспечения зданий. Полученные результаты подтверждают актуальность цифровых инструментов в сфере энергоэффективности и устойчивого развития жилой застройки. Представленные программы могут служить основой для дальнейшей интеграции интеллектуальных технологий управления энергопотреблением и совершенствования методов проектирования инженерных систем.

Перспективы дальнейших исследований по заявленной проблеме:

1. Интеграция разработанного программного обеспечения с технологиями информационного моделирования гражданских и промышленных зданий для повышения точности и комплексности расчетов.

2. Использование методов искусственного интеллекта и машинного обучения для прогнозирования энергопотребления с учетом поведенческих факторов и динамики эксплуатационных режимов.

3. Расширение функционала программного обеспечения для многокритериальной оптимизации, включая экономическую эффективность, экологические показатели и сценарное планирование модернизации инженерных систем жизнеобеспечения.

#### **Библиографический список:**

1. Czock, Berit and Frings, Cordelia and Arnold, Fabian. Cost and cost distribution of policy-driven investments in decentralized heating systems in residential buildings in Germany. *Energy and Buildings*. 2024. 327. 115104. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.115104>
2. Borovkov, A.I., Vafaeva, Kh.M., Vatin, N.I., Ponyaeva, I. Synergistic Integration of Digital Twins and Neural Networks for Advancing Optimization in the Construction Industry: A Comprehensive Review // *Construction Materials and Products*. 2024. Vol. 7. No. 4. <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2024-7-4-7>
3. Вафаева, Х.М., Гаевская, З.А. Алгоритмы оптимизации и их применение в информационном моделировании объектов культурного наследия // *Инновации и инвестиции*. 2021. № 12. С. 175-179. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.20715.92965>
4. Arif, Rashique and Singh, Abhay and Kumar, Alok. Implementation of optimization techniques for reducing the building energy consumption of a residential building. *Engineering Research Express*. 2025. 7. <https://doi.org/10.1088/2631-8695/ade5ec>
5. Felez, Ricardo and Félez, Jesús. Advanced Energy Management for Residential Buildings Optimizing Costs and Efficiency Through Thermal Energy Storage and Predictive Control. *Applied Sciences*. 2025. 15. 880. <https://doi.org/10.3390/app15020880>
6. Liu, Yongchun and Liu, Qingrong and Liang, Qingqing and Ruan, Yingjun and Qian, Fanyue and Xu, Tingting and Meng, Hua and Yao, Yuting. Comparison of the energy flexibility potential of different heating ends in residential buildings. *Journal of Physics: Conference Series*. 2025. 2993. 012012. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2993/1/012012>
7. Олейников, А.А., Тимофеева, К.Н. Система контроля расхода тепловой энергии в контуре горячего водоснабжения в составе системы управления умным домом. *Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки*. 2024; 51(1): 206-214. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2024-51-1-206-214>
8. Рафальская, Т.А. Обоснование применения центрального регулирования по совмещенной нагрузке отопления и горячего водоснабжения в условиях низкотемпературного теплоснабжения // *Известия вузов. Строительство*. 2025. № 5 (797). С. 116-130. <https://doi.org/10.32683/0536-1052-2025-797-5-116-130>
9. Карпов, Д.Ф., Павлов, М.В., Абрамова, Е.В., Разумнова, Е.А. Алгоритмизация и программная реализация подбора параметров работы насосного оборудования в системах водяного отопления жилых зданий. *Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки*. 2025;52(3):199-211. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2025-52-3-199-211>
10. Vaisi, S., Ahmadi, N., Shirzadi, A., Bahrami, B., Shahabi, H., Mahdavejad, M.: A comparison between different machine learning techniques for predicting heating energy consumption for residential buildings in a cold climate. *Energy Efficiency*. 18, 85 (2025). <https://doi.org/10.1007/s12053-025-10379-1>

11. Тальха, И. Анализ энергетического баланса и моделирование системы отопления для жилого дома. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025;52(2):220-226. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2025-52-2-220-226>
12. Diachenko, Serhii. Reconstruction of the heating system as an element of thermal modernization of old multi-story residential buildings. Technical sciences and technologies. 2025. 502-509. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2\(40\)-502-509](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2(40)-502-509)
13. Kaymaz, Egemen and Sezer, Filiz. A Multi-Variable Analysis for Heating Energy Performance and Thermal Comfort in Residential Buildings. Athens Journal of Technology and Engineering. 2025. 22. 1-22. <https://doi.org/10.30958/ajte.X-Y-Z>
14. Polyvianchuk, Andrii and Gritsuk, Igor and Polyvianchuk, Natalia and Yefimov, Oleksii and Romanenko, Sergiy and Kapustenko, P. and Arsenyeva, Olga. Optimized step-by-step modernization of residential heating systems: a multi-period investment strategy for energy efficiency and cost reduction. Thermal Science and Engineering Progress. 2025. 64. 103799. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2025.103799>
15. Dorca, Alexandru and Sarbu, Ioan. Thermal protection impact assessment of a residential house on the energy efficiency of the air-source heat pump radiant floor heating system. Thermal Science and Engineering Progress. 2025. 67. 104059. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2025.104059>
16. Taradai, O and Bugai, Volodymyr and Gvozdetkii, O and Burda, Y and Diachenko, S. Modern Heating Systems for Multi-Story Residential Buildings. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2024. 1376. 012046. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1376/1/012046>
17. Zhang, Zhizheng and Hua, Yunfeng and Peng, Na and Liu, Kailong. Research on Energy-Saving Transformation of Rural Residential Building Envelope Structures and Heating Modes in Northeast China. Energies. 2024. 17. 5195. <https://doi.org/10.3390/en17205195>
18. Rahgozar, Saeed and Ahmadpour, Mohammad and Dehghan, Maziar and Haghgou, Hamidreza and Pourrajabian Shahrababak, Abolfazl. Evaluation of retrofit strategies to improve energy efficiency and winter thermal comfort of an existing residential apartment. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2025. 150. <https://doi.org/10.1007/s10973-025-14352-z>
19. Nakhodov, V. and Shovkaliuk, M. and Mykyta, Yevhenii. Analysis of approaches to determining the quantity of thermal energy for the needs of hot water supply in the energy certification of buildings. Power engineering: economics, technique, ecology. 2023. <https://doi.org/10.20535/1813-5420.3.2022.270242>
20. Kushka, Oleksandr and Liubenko, Volodymyr and Nechypor, Oksana and Petryk, Uliana. Determination of the circulation flow rate in the calculation of internal hot water supply networks. Problems of Water supply, Sewerage and Hydraulic. 2023. 40-46. <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2023.44.40-46>
21. Li, Xianting and Wu, Wei and Yu, Chuck. Energy demand for hot water supply for indoor environments: Problems and perspectives. Indoor and Built Environment. 2014. 24. 5-10. <https://doi.org/10.1177/1420326X14564285>
22. Rubina, Aleš and Uher, Pavel and Vrána, Jakub and Znebežánek, Jiří and Salajka, Radek and Mostek, Jan and Čakl, Dominik and Varbanov, Petar. Monitoring of fresh water consumption and energy needs for hot tap water heating in residential buildings. Thermal Science and Engineering Progress. 2024. 51. 102639. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2024.102639>
23. Balan, Mircea and Sandu, Mihnea and Bode, Florin. In-building direct wastewater heat recovery solutions for enhancing thermal efficiency in domestic hot water systems. E3S Web of Conferences. 2025. 608. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202560801015>
24. Maltais, Louis-Gabriel and Gosselin, Louis. Predictability analysis of domestic hot water consumption with neural networks: From single units to large residential buildings. Energy. 2021. 229. 120658. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120658>
25. Glamazdin, P. and Chepurna, Natalia and Koziachyna, Bohdan. The selection of a methodology for calculating the heat load of hot water supply systems for facilities with significant uneven consumption. Ventilation, Illumination and Heat Gas Supply. 2023. 44. 39-48. <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2023.44.39-48>
26. Canale, Laura and Cholewa, Tomasz and Ficco, G. and Siuta-Olcha, A. and Pietra, B. and Kołodziej, P. and Dell'Isola, Marco. The role of individual metering in reducing domestic hot water consumption in residential buildings: A long-term evaluation. Journal of Building Engineering. 2023. 73. 106734. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106734>
27. Чакин, Е.Ю., Гамаюнова, О.С. Методика выбора энергоэффективных теплоизоляционных материалов с помощью среды визуального программирования Дунамо // Известия Юго-Западного государственного университета. 2024. Т. 28. No. 3. С. 50-68. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-3-50-68>
28. Фролова, А.А., Лухменев, П.И. Расчет уровня энергетически целесообразной теплозащиты // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 1. С. 82-90. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2023.1.82-90>
29. Khmel, Ekaterina and Hurynovich, Anatoly and Holubava, Volha and Romanovski, Valentin. Organizational Models for Managing the Operation of Water Supply Facilities of the Agro-Industrial Complex. World Water Policy. 2025. 11. 735-750. <https://doi.org/10.1002/wwp2.70012>
30. Kapanski, Aliaksei and Hrutovich, Nadzeya and Klyuev, Roman and Brigida, Vladimir. Identification of Easily Accessible Urban Water Consumption Factors for Energy-Efficient Management of Pumping Stations. Water Conservation Science and Engineering. 2025. 10. <https://doi.org/10.1007/s41101-025-00372-1>
31. Нуриев, М.Г., Кремлева, Э.Ш., Пикулева, Н.И., Хафизова, А.Ш. Разработка системы управления умным домом на базе Home Assistant и Zigbee // Международный научно-исследовательский журнал. 2025. № 7 (157). <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.157.11>
32. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021614736. Программа для расчета расходов тепловой энергии на нужды отопления жилого здания: № 2021613736: заявл. 24.03.2021: опубл. 29.03.2021. Бюл. № 4 / М.В. Павлов, Д.Ф. Карпов, С.В. Клопов, В.А. Писаренко, В.П. Березина; правообладатель ВоГУ. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.10808.15364>
33. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021665902. Программа для расчета расходов тепловой энергии на нужды горячего водоснабжения жилого здания: № 2021665271: заявл. 05.10.2021:

#### References:

1. Czock, Berit and Frings, Cordelia and Arnold, Fabian. Cost and cost distribution of policy-driven investments in decentralized heating systems in residential buildings in Germany. *Energy and Buildings*. 2024. 327. 115104. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.115104>
2. Borovkov, A.I., Vafaeva, Kh.M., Vatin, N.I., Ponyaeva, I. Synergistic Integration of Digital Twins and Neural Networks for Advancing Optimization in the Construction Industry: A Comprehensive Review // *Construction Materials and Products*. 2024. Vol. 7. No. 4. <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2024-7-4-7>
3. Vafaeva, Kh.M., Gaevskaya, Z.A. Optimization algorithms and their application in information modeling of cultural heritage objects. *Innovation and Investment*. 2021;12:175-179. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.20715.92965> (In Russ)
4. Arif, Rashique and Singh, Abhay and Kumar, Alok. Implementation of optimization techniques for reducing the building energy consumption of a residential building. *Engineering Research Express*. 2025. 7. <https://doi.org/10.1088/2631-8695/ade5ec>
5. Felez, Ricardo and Félez, Jesús. Advanced Energy Management for Residential Buildings Optimizing Costs and Efficiency Through Thermal Energy Storage and Predictive Control. *Applied Sciences*. 2025. 15. 880. <https://doi.org/10.3390/app15020880>
6. Liu, Yongchun and Liu, Qingrong and Liang, Qingqing and Ruan, Yingjun and Qian, Fanyue and Xu, Tingting and Meng, Hua and Yao, Yuting. Comparison of the energy flexibility potential of different heating ends in residential buildings. *Journal of Physics: Conference Series*. 2025. 2993. 012012. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2993/1/012012>
7. Oleinikov, A. and Timofeeva, K. Thermal Energy consumption monitoring System in the Hot water Supply circuit as part of the Smart Home management system. *Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences*. 2024. 51. 206-214. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2024-51-1-206-214> (In Russ)
8. Rafalskaya, T.A. Rationale for the use of central regulation for joint heating and hot water supply loads in low-temperature heat supply conditions. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2025; (5): 116-130. <https://doi.org/10.32683/0536-1052-2025-797-5-116-130> (In Russ)
9. Karpov, D.F., Pavlov, M.V., Abramova, E.V., Razumnova, E.A. Algorithmization and software implementation for selecting operating parameters of pumping equipment in hydronic heating systems of residential buildings. *Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences*. 2025;52(3):199-211. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2025-52-3-199-211> (In Russ)
10. Vaisi, S., Ahmadi, N., Shirzadi, A., Bahrami, B., Shahabi, H., Mahdavejad, M.: A comparison between different machine learning techniques for predicting heating energy consumption for residential buildings in a cold climate. *Energy Efficiency*. 18, 85 (2025). <https://doi.org/10.1007/s12053-025-10379-1>
11. Talha, I. Energy balance analysis and heating system modeling for a residential building. *Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences*. 2025;52(2):220-226. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2025-52-2-220-226> (In Russ)
12. Diachenko, Serhii. Reconstruction of the heating system as an element of thermal modernization of old multi-story residential buildings. *Technical sciences and technologies*. 2025. 502-509. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2\(40\)-502-509](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2(40)-502-509)
13. Kaymaz, Egemen and Sezer, Filiz. A Multi-Variable Analysis for Heating Energy Performance and Thermal Comfort in Residential Buildings. *Athens Journal of Technology and Engineering*. 2025;22:1-22. <https://doi.org/10.30958/ajte.X-Y-Z>
14. Polyvianchuk, Andrii and Gritsuk, Igor and Polyvianchuk, Natalia and Yefimov, Oleksii and Romanenko, Sergiy and Kapustenko, P. and Arsenyeva, Olga. Optimized step-by-step modernization of residential heating systems: a multi-period investment strategy for energy efficiency and cost reduction. *Thermal Science and Engineering Progress*. 2025. 64. 103799. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2025.103799>
15. Dorca, Alexandru and Sarbu, Ioan. Thermal protection impact assessment of a residential house on the energy efficiency of the air-source heat pump radiant floor heating system. *Thermal Science and Engineering Progress*. 2025. 67. 104059. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2025.104059>
16. Taradai, O and Bugai, Volodymyr and Gvozdetskii, O and Burda, Y and Diachenko, S. Modern Heating Systems for Multi-Story Residential Buildings. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2024. 1376. 012046. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1376/1/012046>
17. Zhang, Zhizheng and Hua, Yunfeng and Peng, Na and Liu, Kailong. Research on Energy-Saving Transformation of Rural Residential Building Envelope Structures and Heating Modes in Northeast China. *Energies*. 2024;17. 5195. <https://doi.org/10.3390/en17205195>
18. Rahgozar, Saeed and Ahmadpour, Mohammad and Dehghan, Maziar and Haghgou, Hamidreza and Pourrajabian Shahrabak, Abolfazl. Evaluation of retrofit strategies to improve energy efficiency and winter thermal comfort of an existing residential apartment. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2025. 150. <https://doi.org/10.1007/s10973-025-14352-z>
19. Nakhodov, V. and Shovkaliuk, M. and Mykyta, Yevhenii. Analysis of approaches to determining the quantity of thermal energy for the needs of hot water supply in the energy certification of buildings. *Power engineering: economics, technique, ecology*. 2023. <https://doi.org/10.20535/1813-5420.3.2022.270242>
20. Kushka, Oleksandr and Liubenko, Volodymyr and Nechypor, Oksana and Petryk, Uliana. Determination of the circulation flow rate in the calculation of internal hot water supply networks. *Problems of Water supply, Sewerage and Hydraulic*. 2023. 40-46. <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2023.44.40-46>
21. Li, Xianting and Wu, Wei and Yu, Chuck. Energy demand for hot water supply for indoor environments: Problems and perspectives. *Indoor and Built Environment*. 2014. 24. 5-10. <https://doi.org/10.1177/1420326X14564285>
22. Rubina, Aleš and Uher, Pavel and Vrána, Jakub and Znebejánek, Jiří and Salajka, Radek and Mostek, Jan and Cakl, Dominik and Varbanov, Petar. Monitoring of fresh water consumption and energy needs for hot tap water heating in

- residential buildings. Thermal Science and Engineering Progress. 2024. 51. 102639. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2024.102639>
23. Balan, Mircea and Sandu, Mihnea and Bode, Florin. In-building direct wastewater heat recovery solutions for enhancing thermal efficiency in domestic hot water systems. E3S Web of Conferences. 2025. 608. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202560801015>
24. Maltais, Louis-Gabriel and Gosselin, Louis. Predictability analysis of domestic hot water consumption with neural networks: From single units to large residential buildings. Energy. 2021. 229. 120658. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120658>
25. Glamazdin, P. and Chepurna, Nataliia and Koziachyna, Bohdan. The selection of a methodology for calculating the heat load of hot water supply systems for facilities with significant uneven consumption. Ventilation, Illumination and Heat Gas Supply. 2023. 44. 39-48. <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2023.44.39-48>
26. Canale, Laura and Cholewa, Tomasz and Ficco, G. and Siuta-Olcha, A. and Pietra, B. and Kołodziej, P. and Dell'Isola, Marco. The role of individual metering in reducing domestic hot water consumption in residential buildings: A long-term evaluation. Journal of Building Engineering. 2023. 73. 106734. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106734>
27. Chakin, E. and Gamayunova, Olga. Methodology for selecting energy-efficient thermal insulation materials using the Dynamo visual programming environment. Proceedings of the Southwest State University. 2024. 28. 50-68. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-3-50-68> (In Russ)
28. Frolova, A.A., Lukhmenov, P.I. Calculation of the level of energy efficient heat protection. Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023;18(1):82-90. DOI.org/10.22227/1997-0935.2023.1.82-90 (In Russ)
29. Khmel, Ekaterina and Hurynovich, Anatoly and Holubava, Volha and Romanovski, Valentin. Organizational Models for Managing the Operation of Water Supply Facilities of the Agro-Industrial Complex. World Water Policy. 2025. 11. 735-750. <https://doi.org/10.1002/wwp2.70012>
30. Kapanski, Aliaksei and Hruntovich, Nadzeya and Klyuev, Roman and Brigida, Vladimir. Identification of Easily Accessible Urban Water Consumption Factors for Energy-Efficient Management of Pumping Stations. Water Conservation Science and Engineering. 2025. 10. <https://doi.org/10.1007/s41101-025-00372-1>
31. Nuriev, M.G., Kremleva, E.S., Pikuleva, N.I., Khafizova, A.S. Development of a smart home control system based on Home Assistant and Zigbee *International Research Journal*. 2025;7 (157). DOI:10.60797/IRJ.2025.157.11 (In Russ)
32. Computer Program State Registration Certificate No. 2021614736. Software "Calculation of Heat Energy Consumption for Heating a Residential Building": No. 2021613736: declared 24.03.2021: publ. 29.03.2021. Bull. No. 4 / M.V. Pavlov, D.F. Karpov, S.V. Klopov, V.A. Pisarenko, V.P. Berezina; right holder of VoSU. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.10808.15364> (In Russ)
33. Computer Program State Registration Certificate No. 2021665902. Software "Calculation of Heat Energy Consumption for Domestic Hot Water Supply in a Residential Building": No. 2021665271: declared 05.10.2021: publ. 05.10.2021. Bull. No. 10 / M.V. Pavlov, D.F. Karpov, S.V. Klopov, V.A. Pisarenko, V.P. Zhukova; right holder of VoSU. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.17519.04009> (In Russ)

#### Сведения об авторах:

Карпов Денис Федорович, старший преподаватель, кафедра теплогазоводоснабжения; [karpovdf@vogu35.ru](mailto:karpovdf@vogu35.ru); ORCID 0000-0002-3522-9302

Павлов Михаил Васильевич, кандидат технических наук, доцент, доцент, кафедра теплогазоводоснабжения; [pavlovmv@vogu35.ru](mailto:pavlovmv@vogu35.ru); ORCID 0000-0002-8687-3296

Абрамова Елена Вячеславовна, доктор технических наук, профессор, кафедра сварки, диагностика и специальной робототехники; главный научный сотрудник, НИИСФ РААСН; [eva32@bk.ru](mailto:eva32@bk.ru); РИНЦ ID 107200  
Заикин Владимир Константинович, старший преподаватель, кафедра начертательной геометрии и инженерной графики; [zaikin.vladimir@yandex.ru](mailto:zaikin.vladimir@yandex.ru); РИНЦ ID 738199

#### Information about authors:

Denis F. Karpov, Senior Lecturer, Department of Heat, Gas and Water Supply; [karpovdf@vogu35.ru](mailto:karpovdf@vogu35.ru); ORCID 0000-0002-3522-9302

Mikhail V. Pavlov, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Assoc. Prof., Department of Heat, Gas and Water Supply; [pavlovmv@vogu35.ru](mailto:pavlovmv@vogu35.ru); ORCID 0000-0002-8687-3296

Elena V. Abramova, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Department of Welding, Diagnostics and Special Robotics; Chief Scientific Officer, NIISF RAASN; [eva32@bk.ru](mailto:eva32@bk.ru); RSCI ID 107200

Vladimir K. Zaikin, Senior Lecturer, Department of Descriptive Geometry and Engineering Graphics; [zaikin.vladimir@yandex.ru](mailto:zaikin.vladimir@yandex.ru); RSCI ID 738199

#### Конфликт интересов/Conflict of interests.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов/The authors declare that there are no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 01.09.2025

Одобрена после рецензирования/Revised 30.09.2025

Принята в печать/Accepted for publication 08.10.2025

## Методика статического расчета нелинейных мембранно-пневматических систем С.В. Полников

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.,  
410054, г. Саратов, ул. Политехническая, д.77, Россия

**Резюме. Цель.** Целью исследования является разработка методики статического нелинейного расчета мембранно-пневматических систем на силовые нагрузки и воздействия различного рода. **Метод.** В основе расчета нелинейных линзообразных мембранно-пневматических систем лежит известный шаговый метод приращения параметров и возможности итерационного процесса численной процедуры Эйлера-Коши с повышенным числом итераций, с применением на шаге метода конечных элементов. Поскольку производится расчет пневматических систем, в основы работы которых лежит сжатый воздух, используется система уравнений, которая включает в себя универсальное уравнение состояния газа и формулу для определения приращения давления в герметичном пространстве, образуемом линзообразным покрытием сооружения. **Результат.** Представлен модифицированный итерационный метод приращения параметров и соответствующий численный подход, повышающий точность решения нелинейных уравнений. Основное улучшение заключается в увеличении числа итераций с обычных трех до тридцати. Осуществлен расчет линзообразной мембранно-пневматической системы пролетом сто двадцать метров на действие участковой распределенной на полупролете снеговой нагрузки. **Вывод.** Предложенная методика может использоваться для расчета не только линзообразных сооружений, но и для расчета воздухоопорных и пневмокаркасных объектов.

**Ключевые слова:** линзообразное мембранно-пневматическое покрытие, статический расчет сооружений с учетом нелинейных факторов, модифицированная методика с применением шагового метода и численной процедуры Эйлера-Коши

**Для цитирования:** С.В. Полников. Методика статического расчета нелинейных мембранно-пневматических систем. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025;52(4):225-231. DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-4-225-231

## Method for static calculation of non-linear membrane-pneumatic systems S.V. Polnikov

Yuri Gagarin State Technical University  
77 Politekhnikeskaya Str., Saratov 410054, Russia

**Abstract. Objective.** The aim of the study is to develop a methodology for the static non-linear calculation of membrane-pneumatic systems for force loads and various impacts. **Method.** The calculation of nonlinear lens-shaped membrane-pneumatic systems is based on the well-known stepwise method of parameter increment and the possibilities of the iterative process of the Euler-Cauchy numerical procedure with an increased number of iterations, using the finite element method at each step. Since the calculation of pneumatic systems based on compressed air is performed, a system of equations is used that includes a universal equation of state of a gas and a formula for determining the pressure increment in a sealed space formed by the lens-shaped roof of the structure. **Result.** A modified iterative method of parameter increment and a corresponding numerical approach are presented, which improve the accuracy of solving nonlinear equations. The main improvement lies in increasing the number of iterations from the usual three to thirty. A lens-shaped membrane-pneumatic system with a span of one hundred twenty meters was

calculated for the action of a sectional snow load distributed over a half-span. Conclusion. The proposed method can be used to calculate not only lens-shaped structures, but also air-supported and pneumatic-framed objects.

**Keywords:** lenticular membrane-pneumatic coating, static calculation of structures taking into account nonlinear factors, modified technique using the step method and the Euler-Cauchy numerical procedure

**For citation:** S.V. Polnikov. Method for static calculation of non-linear membrane-pneumatic systems. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2025;52(4):225-231. (In Russ) DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-4-225-231

**Введение.** В статье описывается методика выполнения нелинейного статического расчета мембранно-пневматических покрытий для сооружений больших пролётов, несущая способность которых усилена с помощью повышенного избыточного давления воздуха.

**Постановка задачи.** Методика расчета основывается на алгоритме, суть которого сводится к последовательному увеличению количества итераций в численной процедуре Эйлера –Коши в зависимости от решаемой задачи [1-3]. В основе лежит численная процедура Эйлера-Коши с повышенным числом итераций, достигающим при решении некоторых тестовых задач до двадцати пяти.

Как показало проведенное численное исследование на тестовых задачах меньше всего итерация требуется для определения геометрической и физической нелинейности мембран покрытия сооружения, выполненных как правило из стали, а больше всего для определения физической нелинейности воздуха, закаченного между герметичными мембранами покрытия сооружения.

Целью исследования является разработка методики статического нелинейного расчета мембранно-пневматических систем на силовые нагрузки и воздействия различного рода.

Новизна предложенного подхода проявляется в ряде важных моментов [4,5]. Так, предлагаемая методика, использующая известный шаговый метод приращений параметров, который базируется на применении численной процедуры Эйлера-Коши третьего порядка точности. Это обеспечивает повышение точности результатов расчета по сравнению с другими численными процедурами.

**Методы исследования.** На начальном этапе задача решается с использованием метода приращений первого порядка точности, применяя формулу Эйлера. Это позволяет получить начальное приближение решения, которое затем уточняется на последующих итерациях. Предложенный метод сочетает в себе современные численные подходы и учитывает важные аспекты нелинейного поведения систем под воздействием различных нагрузок, что делает его эффективным инструментом для решения сложных инженерных задач [6-8].

В предложенной методике используется усовершенствованная численная процедура Эйлера-Коши третьего порядка точности для расчета системы с учетом корректируемых нагрузок, которые изменяются в процессе нагружения.

Для начала решения задачи применяется метод приращений первого порядка точности, который реализуется с использованием формулы Эйлера первого порядка точности. Это означает, что на первом этапе расчетов мы получаем начальное приближение решения, основываясь на простом линейном подходе, который учитывает изменения параметров системы [1,3].

Данная методика обеспечивает последовательное уточнение расчетов, начиная с первого приближения и постепенно улучшая результаты за счет применения более сложных и точных численных методов. Это позволяет более эффективно учитывать все нагрузки и их влияние на систему в процессе расчета.

1) Решение задачи в первом приближении, т.е. методом приращений первого порядка точности с применением формулы Эйлера:

$$\Delta Z_{nv}^{(1)} = \sum_{\mu=1}^{\mu=\mu} \Delta x_{n\mu} \cdot A'_{v\mu}(x_{n-1,\mu}, y_{n-1}) \quad (1)$$

2) Решение задачи в с-том приближении по формуле:

$$\Delta Z_{nv}^{(c)} = \sum_{\mu=1}^{\mu=\mu} \Delta x_{n\mu} \cdot A'_{v\mu}\left(x_{n-1,\mu} + \frac{\Delta x_{n\mu}}{2}, y_{n-1} + \frac{\Delta y_n^{(c-1)}}{2}\right) \quad (2)$$

где  $3 \leq c \leq C_k \leq 30$ .

Так как в расчете мы имеем дело с пневматическими сооружениями, где одним из главных компонентов является воздух, то в методике расчета таких сооружений присутствуют две формулы для учета воздействия воздуха на мембраны покрытия сооружения, формула для расчета приращения давления и универсальное уравнение состояния газа.

$$\Delta P^{(c+1)} = \Delta P^{(c)} - DP^{(c)} \quad (3)$$

$$\frac{P_0 V_0}{T_0} = \frac{PV}{T} \quad (4)$$

В статье показан модифицированный итерационный метод приращения параметров и соответствующий численный подход, чтобы повысить точность решения нелинейных уравнений. Стоит отметить, что этот метод разработан специально для расчетов пневматических систем. Результаты численного исследования показали, что данный метод обеспечивает высокий уровень точности при расчете прогибов и сил в соответствующих точках, что подтверждает высокое качество численного исследования.

**Обсуждение результатов.** Рассмотрим для примера решение тестовой задачи на расчет линзообразной мембранно-пневматической системы пролетом сто двадцать метров на действие участковой распределенной на полупролете снеговой нагрузки: избыточное давление в линзе 4000 Па. Мембранно-пневматическая система показана на рис. 1

Мембраны выполнены из стали Ст 3, толщина верхней 6 мм, а несущей нижней 8мм. Избыточное давление в полости пневмолинзы составляет 105 000 Па. Снеговая нагрузка QL на всем пролете, одношаговый расчет.

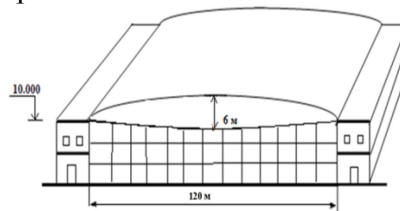


Рис. 1 – Мембранно-пневматическое сооружение пролетом 120 метров

Fig. 1 – Membrane-pneumatic structure with a span of 120 meters

Расчетная схема показана на рис. 2.

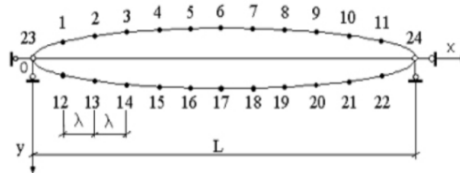


Рис. 2 – Расчетная схема мембранно-пневматического сооружения

Fig. 2 – Calculation scheme of the membrane-pneumatic structure

Исходные данные

Число шагов для расчета  $N=1$

Число итераций на одном шаге для расчета  $C=24$

Признак падения и возрастания давления  $P=0$

Наличие силы  $Q=1$

Наличие воздействия температуры  $T=0$

Наличие воздействия кинематической силы  $C=0$

ЕI% - индикатор наличия изгиба, 1-есть, 0-нет, EU =1

Протяженность конструкции между точками опоры L =120

Расчет на шаге N=1

Счет на шаге N =1 CI =1

Величина объем полости линзы в процессе эксплуатации V2= 233.9978928932476

Изменение объема внутри полости линзы  $\Delta V = -0.14634633745$

Давление внутри линзы P (SL%) =105019.1

Приращение давления в линзе в результате деформации PC (SL%) = 277.5475

Счет на шаге N =1 CI =3

Величина объем полости линзы в процессе эксплуатации V2=234.0247034679128

Изменение объема внутри полости линзы  $\Delta V = -0.1453534633567$

Давление внутри линзы P (SL%) =106008.1

Изменение давления в линзе в результате деформации PC (SL%) =305.4953

Счет на шаге N =1 CI =19

Величина объем полости линзы в процессе эксплуатации V2=234.0211157530955

Изменение объема внутри полости линзы  $\Delta V = -0.1600092469044796$

Приращение давления в линзе в результате деформации PC (SL%) =269.4534

Счет на шаге N =1 CI =25

Результаты в конце шага N=1

Величина объем полости линзы в процессе эксплуатации V2=233.8611201470188

Изменение объема внутри полости линзы  $\Delta V = -0.3200048529811852$

Приращение давления в линзе PN (SL%) =303.4853

Избыточное давление в линзе PL (SL%) =4303.4853

Давление внутри линзы P (SL%) =105303.4853

#### Пневматические нагрузки на стадии эксплуатации

|                                |                                |
|--------------------------------|--------------------------------|
| SIM (1) = -73.5560607653357#   | SIM (2) = -360.0364533333753#  |
| SIM (3) = -63.63554333053366#  | SIM (4) = -375.0636357653574#  |
| SIM (5) = -30.6636707773357#   | SIM (6) = -374.3756375036433#  |
| SIM (7) = -30.30630033367373#  | SIM (8) = -377.4636076005307#  |
| SIM (9) = -30.37337737733473#  | SIM (10) = -377.6574665336303# |
| SIM (11) = 0                   | SIM (12) = -377.3750053777773# |
| SIM (13) = 30.37337737733367#  | SIM (14) = -377.6574665336377# |
| SIM (15) = 30.30630033367736#  | SIM (16) = -377.4636076005373# |
| SIM (17) = 30.6636707773663#   | SIM (18) = -374.3756375036777# |
| SIM (19) = 63.63554333050547#  | SIM (20) = -375.0636357653033# |
| SIM (21) = 73.55606076533606#  | SIM (22) = -360.0364533333776# |
| SIM (23) = -63.66473636644357# | SIM (24) = 375.0053663335064#  |
| SIM (25) = -60.73747576636736# | SIM (26) = 376.3355565633663#  |
| SIM (27) = -60.6473065676774#  | SIM (28) = 377.4473036703606#  |
| SIM (29) = -30.47033335673647# | SIM (30) = 375.5005364373636#  |
| SIM (31) = -35.53335730433537# | SIM (32) = 374.5777043633673#  |
| SIM (33) = 0                   | SIM (34) = 374.4703636353677#  |
| SIM (37) = 35.53335730433733#  | SIM (36) = 374.5777043633673#  |
| SIM (37) = 30.47033335673633#  | SIM (38) = 375.5005364373733#  |
| SIM (39) = 60.6473065676774#   | SIM (40) = 377.4473036703344#  |
| SIM (41) = 60.73747576636466#  | SIM (42) = 376.3355565633733#  |
| SIM (43) = 63.66473636644633#  | SIM (44) = 375.0053663335067#  |

Суммарные горизонтальные перемещения и вертикальные перемещения  
на шаге N=1

|                                 |                                       |
|---------------------------------|---------------------------------------|
| U (1) = 6.284947466642447D-04   | V (1) = 5.771208673931539D-03         |
| U (2) = 9.064404491792996D-04   | V (2) = .0104728230323212D-01         |
| U (3) = 9.011065428940217D-04   | V (3) = .0140501529367025D-01         |
| U (4) = 7.33697482369551D-04    | V (4) = 1.706106577192919D-01         |
| U (5) = 4.055428094971367D-04   | V (5) = 1.877749506766422D-01         |
| U (6) = -3.530975929322013D-04  | <u>V (6) = 1.914159524204323D-01</u>  |
| U (7) = -4.055428094978867D-04  | V (7) = 1.877749506766691D-01         |
| U (8) = -7.33697482370406D-04   | V (8) = 1.706106577193401D-01         |
| U (9) = -9.011065428949444D-04  | V (9) = 1.405015293670819D-01         |
| U (10) = -9.064404491801258D-04 | V (10) = 1.047282303232607D-02        |
| U (11) = -6.284947466647538D-04 | V (11) = 5.771208673934299D-03        |
| U (12) = 7.134250597895554D-04  | V (12) = -2.547522547260301D-03       |
| U (13) = 2.504397359691547D-04  | V (13) = 2.125278384508049D-03        |
| U (14) = -9.108938131861513D-04 | V (14) = 1.404018469923477D-02        |
| U (15) = -2.296969329327237D-04 | V (15) = 8.614553416621804D-03        |
| U (16) = -7.996037468916633D-05 | V (16) = 1.030762314101923D-02        |
| U (17) = 2.844169738660936D-04  | <u>V (17) = 1.912882084281139D-02</u> |
| U (18) = 7.996037468976961D-05  | V (18) = 1.030762314102113D-02        |
| U (19) = 2.296969329334221D-04  | V (19) = 8.614553416625604D-03        |
| U (20) = 9.108938131870038D-04  | V (20) = 1.404018469924047D-02        |
| U (21) = -2.504397359685375D-04 | V (21) = 2.125278384511751D-03        |
| U (22) = -7.134250597892292D-04 | V (22) = -2.547522547258527D-03       |
| U (23) = 0                      | V (23) = 0                            |
| U (24) = 0                      | V (24) = 0                            |

**Таблица 1. Расчет пневматической системы на действие снеговой нагрузки на половине пролета**

**Table 1. Calculation of the pneumatic system for the action of snow load at half the span**

| № | Методика расчета<br>Calculation Methodology   | Приращение избыточного давления воздуха в линзе<br>Increase in excess air pressure in the lens | Различие в приращениях избыточного давления воздуха, выраженное в процентах<br>The difference in excess air pressure increments, expressed as a percentage |
|---|---|--|--|
| 1 | Расчет 1 порядка точности при $C_k = 1$<br>First-order accuracy calculation at                  | PC(SL%) = 277.5475 Па  | 8,54%  |
| 2 | Расчет 3 порядка точности при $C_k = 3$<br>Third-order accuracy calculation at                  | PC(SL%) = 305.4953 Па  | - 0,66%  |
| 3 | Расчет с учетом последействия при $C_k = 25$<br>Calculation taking into account aftereffects at | PN(SL%) = 303.4843 Па  | -  |

В табл. 1 влияние общей нелинейности составило примерно 8,54%. От участковой нагрузки прогибы меньше, поэтому меньше и нелинейность. Учитывая относительную небольшую нагрузку на линзообразное покрытие и высокую несущую способность сжатого воздуха, находящегося между гибких мембран покрытия сооружения, прогиб в данном примере в точке V6 составляет 19.1 см., что допустимо по всем нормам.

Разработанная автором методика и программа для расчета линзообразных большепролетных систем объединяет различные методы решения задач и позволяет рассчитывать различные конструкции с пролетами в сотни метров и более. В дальнейшем мы рассмотрим традиционные аспекты алгоритма, включая загрузку системы МКЭ на каждом этапе.

В методе последовательных нагрузок проводится проверка состояния системы на каждом этапе, используя определитель системы решений, основанный на методе конечных элементов. Когда данный определитель достигает нулевого значения, это указывает на потерю устойчивости системы, что отражается в выводах программы для расчета.

Следует отметить, что в случае значительных деформаций (вызванных изменением переменных параметров нелинейной системы) устойчивость системы на первых стадиях не гарантирует ее устойчивости на последующих стадиях. Поэтому необходимо проводить исследования на ее устойчивость на всем протяжении процесса деформации покрытия.

Условием предельного равновесия мембранной системы, которая имеет жесткий контур, является выполнение определенного равенства.

Это равенство отражает баланс сил и моментов в системе, обеспечивая ее стабильность и предотвращая деформацию или разрушение:

$$\det|A_{v\mu}| = 0, \quad v = \overline{1, m};, \quad \mu = \overline{1, M} \quad (5)$$

Когда изменяется один из параметров  $x$  (например, это может быть параметр нагрузки  $q$ , давление  $P$ , температура  $T$  или осадка опор  $C$ ), условием предельного равновесия системы становится выполнение определенного равенства:

$$\frac{\partial Z_v}{\partial x_\mu} = A'_{v\mu} = 0, \quad (6)$$

что дает выражение условия параллельности координатной оси параметра  $x_\mu$  и касательной, проведенной к кривой решения  $Z_v(x_\mu)$ . Это условие указывает на то, что направление изменения параметра  $x_\mu$  совпадает с направлением касательной к кривой решения в данной точке.

Если рассматривать поэтапное решение статической задачи для континуальных расчетных схем на произвольной итерации метода последовательных нагружений, то это означает, что на каждом этапе итерации необходимо проверять, сохраняется ли данное условие.

Это важно для обеспечения корректности расчетов и стабильности системы в процессе ее анализа.

$$\Delta Z_{nv}^{(c)} = \sum_{\mu=1}^{\mu=\mu} \Delta x_{n\mu} \cdot A'_{v\mu}(x_{n\mu}^{(c)}, y_n^{(c)}) \quad (7)$$

Предполагает процедуру вычисления производных Фреше, то поэтапное применение метода конечных элементов при дискретных расчетных схемах не требует вычисления частных производных Фреше  $A'_{v\mu}(x_{n\mu}^{(c)}, y_n^{(c)})$ , а позволяет сразу определять искомые приращения функций  $\Delta Z_{nv}^{(c)}$  решением системы алгебраических уравнений, матрицей линейного преобразования которой является матрица жесткости рассчитываемой конструкции [2].

**Вывод.** В статье показано, что усовершенствование численной процедуры Эйлера-Коши, а именно увеличение числа итераций с совместным применением шагового метода приращений параметров может помочь для расчета многих нелинейных линзообразных пневматических систем. Основное улучшение заключается в увеличении числа итераций с обычных трех до тридцати.

На каждой итерации расчет продолжается до тех пор, пока значения приращения давления воздуха на предыдущем и текущем шагах не станут идентичными.

Такой подход позволяет провести полный анализ процесса нагружения нелинейных пневматических систем, включая воздействия силовых, температурных, кинематических и пневматических нагрузок.

Важно отметить, что для обеспечения устойчивости системы на всех этапах деформации, особенно при значительных прогибах, требуется большое количество итераций. В процессе расчетов принимаются во внимание упругие свойства воздуха, который закачивается в закрытое пространство пневматической линзы.

#### Библиографический список:

1. Городецкий А.С. Метод конечных элементов в проектировании транспортных сооружений / А.С. Городецкий. - М.: Транспорт, 1981. - 143 с.
2. Давиденко Д.Ф. О приложении метода вариации параметра к теории нелинейных функциональных уравнений / Д.Ф. Давиденко // Укр. матем. журнал. 1955. Т. 7.- С. 56-64.

3. Игнатъев В.А. Расчет мембранно-пневматических сооружений с учетом нелинейных факторов / В.А. Игнатъев, А.Ю. Ким // Вестник СГАУ.- 2004. № 4.- С. 43-45.
4. Ким А.Ю. Итерационный метод приращений параметров в теории расчета нелинейных мембранно-пневматических систем / А.Ю. Ким.- Саратов: Изд-во СГТУ, 2005. - 188 с.
5. Ким А.Ю. Итерационный метод приращений параметров для расчёта нелинейных мембранно-пневматических систем с учётом упругой работы воздуха // Вестник СГАУ.- 2005.- № 1.- С. 39-42.
6. Петров В.В. Метод последовательных нагружений в нелинейной теории пластинок и оболочек / В.В. Петров.- Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1975. - 118 с.
7. Пирумов У.Г. Численные методы / У.Г. Пирумов.- М.: Изд-во Дрофа, 2003. - 224 с.
8. Ким А.Ю., Амоян М.Ф., Хапилин В.Е. Алгоритм численного расчета нелинейных линзообразных мембранно-пневматических систем итерационным методом приращений параметров с учетом последствия давления воздуха. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022;49(2):133-142. DOI.org/10.21822/2073-6185-2022-49-2-133-142

#### References:

1. Gorodetsky, A.S. Finite Element Method in Designing Transport Facilities. - Moscow: Transport. 1981: 143 p. (In Russ)
2. Davidenko, D.F. On the Application of the Parameter Variation Method to the Theory of Nonlinear Functional Equations. *Ukrainian Math. Journal*. 1955;7:56-64.
3. Ignatyev, V.A. Calculation of Membrane-Pneumatic Structures Taking into Account Nonlinear Factors / V.A. Ignatyev, A.Yu. Kim. *Bulletin of SSTU*. 2004; 4.: 43-45. (In Russ)
4. Kim, A.Yu. Iterative Method of Parameter Increments in the Theory of Calculating Nonlinear Membrane-Pneumatic Systems - Saratov: Publishing House of SSTU, 2005;188. (In Russ)
5. Kim A. Yu. Iterative method of parameter increments for calculating nonlinear membrane-pneumatic systems taking into account the elastic work of air. *Bulletin of SSAU*. 2005;1:39-42. (In Russ)
6. Petrov V. V. Method of successive loadings in the nonlinear theory of plates and shells . Saratov: Publishing house of Saratov University, 1975;118. (In Russ)
7. Pirumov U. G. Numerical methods. - Moscow: Publishing house Drofa, 2003:224. (In Russ)
8. Kim A.Yu., Amoyan M.F., Khapilin V.E. Algorithm for numerical calculation of nonlinear lenticular membrane-pneumatic systems by iterative method of parameter increments taking into account the aftereffect of air pressure. Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences. 2022;49(2):133-142. (In Russ) <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2022-49-2-133-142>

#### Сведения об авторе:

Полников Сергей Валерьевич, старший преподаватель, кафедра «Строительные материалы конструкции и технологии»; [werad91@mail.ru](mailto:werad91@mail.ru); ORCID0000-0002-4670-309X

#### Information about author:

Sergey V. Polnikov, Senior Lecturer, Department of Building Materials, Construction and Technology; [werad91@mail.ru](mailto:werad91@mail.ru); ORCID0000-0002-4670-309X

#### Конфликт интересов/Conflict of interests.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов/The author declare that there are no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 01.09.2025

Одобрена после рецензирования/Revised 30.09.2025

Принята в печать/Accepted for publication 08.10.2025

## Расчёт линзообразного покрытия мембранно-пневматического сооружения с учётом нелинейных факторов

В.Е. Хапилин

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.,  
410054, г. Саратов, ул. Политехническая, д.77, Россия

**Резюме. Цель.** Целью исследования является разработка и апробация методики расчёта линзообразных мембранно-пневматических покрытий с учётом геометрической и физической нелинейности. Актуальность задачи обусловлена растущим интересом к пневматическим сооружениям в строительной практике, где требуется надёжное и экономичное решение для перекрытия больших пролётов. **Метод.** В работе применён усовершенствованный итерационный метод приращений параметров, основанный на численных процедурах Эйлера и Эйлера–Коши. В отличие от классических подходов (МКЭ, алгоритмы Ньютона–Рафсона, метод последовательных нагружений), предложенный метод обладает большей устойчивостью к накоплению ошибок и обеспечивает возможность регулировать точность за счёт изменения количества итераций и шага нагружения. Для практической реализации разработан программный комплекс, позволяющий учитывать как геометрическую, так и физическую нелинейность, а также внутреннее давление в оболочке. **Результат.** Численное моделирование показало, что при пролёте 60 м геометрическая нелинейность составляет около 7%, а физическая - порядка 6%. Проведённые расчёты для различных пролётов (60–100 м) подтвердили закономерность роста нелинейности с увеличением размеров покрытия. Полученные результаты демонстрируют, что использование линейных методов приводит к занижению деформаций и недооценке несущей способности конструкции. **Вывод.** Применение модифицированного метода приращений параметров позволяет повысить точность и надёжность расчётов линзообразных пневматических сооружений при приемлемой вычислительной трудоёмкости. Разработанная методика и программный комплекс могут быть рекомендованы для инженерных расчётов, проектирования спортивных и выставочных объектов, а также временных павильонов. Практическая значимость работы заключается в оптимизации расхода материалов и повышении эксплуатационной надёжности пневматических систем.

**Ключевые слова:** линзообразное покрытие, пневматические конструкции, метод приращений параметров, нелинейность, мембранные системы

**Для цитирования:** В.Е. Хапилин. Расчёт линзообразного покрытия мембранно-пневматического сооружения с учётом нелинейных факторов. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025;52(4):232-237. DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-4-232-237

## Calculation of the lens-shaped coating of a membrane-pneumatic structure taking into account nonlinear factors

V.E. Khapilin

Yuri Gagarin State Technical University  
77 Politekhnicheskaya Str., Saratov 410054, Russia

**Abstract. Objective.** The aim of the study is to develop and test a calculation method for lens-shaped membrane-pneumatic roofs taking into account geometric and physical nonlinearity. The relevance of the problem is due to the interest in pneumatic structures in construction practice, where a reliable and cost-effective solution for covering large spans is required. **Method.**

The study applies an improved iterative method of parameter increments based on the Euler and Euler-Cauchy numerical procedures. Unlike classical approaches (FEM, Newton-Raphson algorithms, the method of successive loadings), the proposed method is more resistant to error accumulation and provides the ability to adjust accuracy by changing the number of iterations and the loading step. For practical implementation, a software package has been developed that allows for taking into account both geometric and physical nonlinearity, as well as the internal pressure in the shell. **Result.** Numerical modeling showed that for a 60-meter span, geometric nonlinearity is approximately 7%, while physical nonlinearity is approximately 6%. Calculations for various spans (60–100 m) confirmed the pattern of increasing nonlinearity with increasing roof size. The results demonstrate that the use of linear methods leads to an underestimation of deformations and an underestimation of the structure's load-bearing capacity. **Conclusion.** The use of a modified parameter increment method improves the accuracy and reliability of calculations for lenticular pneumatic structures while maintaining acceptable computational complexity. The developed methodology and software package can be recommended for engineering calculations, the design of sports and exhibition facilities, and temporary pavilions. The practical significance of this work lies in the optimization of material consumption and increased operational reliability of pneumatic systems.

**Keywords:** lens-shaped coating, pneumatic structures, method of parameter increments, nonlinearity, membrane systems

**For citation:** V.E. Khapilin. Calculation of the lens-shaped coating of a membrane-pneumatic structure taking into account nonlinear factors. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2025;52(4):232-237. (In Russ) DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-4-232-237

**Введение.** Пневматические конструкции активно используются в мировой практике при создании временных и стационарных объектов. В России линзообразные сооружения пока редки, однако их потенциал очевиден: они позволяют возводить долговечные и энергоэффективные покрытия при относительно низкой себестоимости. Конструкции данного типа относятся к категории гибких систем, для которых характерно проявление нелинейных эффектов. В соответствии с «золотым правилом» строительной механики, снижение жёсткости элементов сопровождается усилением нелинейности работы конструкции [1-3]. В настоящей статье рассматривается расчёт покрытия мембранно-пневматического сооружения без стоек рис. 1, расчётная схема представлена на рис. 2. Внутри оболочки поддерживается избыточное давление порядка 105 000 Па при атмосферном значении около 101 000 Па [4, 5, 6].

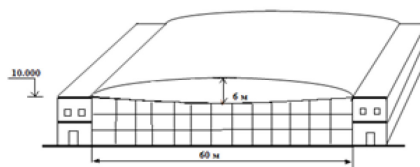


Рис. 1 – Однопролетное мембранно-пневматическое сооружение  
Fig. 1 – Single-span membrane-pneumatic structure

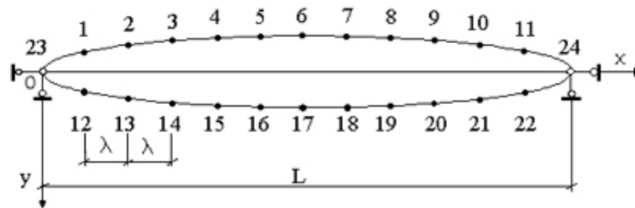


Рис. 2 – Расчетная схема мембранно-пневматического сооружения  
Fig. 2 – Design scheme of a membrane-pneumatic structure

**Постановка задачи.** Расчёт линзообразных мембранно-пневматических покрытий осложняется проявлением геометрической и физической нелинейности, что делает традиционные методы анализа недостаточно точными. Необходимо разработать подход, который обеспечит устойчивость вычислений и достоверность результатов при приемлемой трудоёмкости. В данной работе ставится задача применения и проверки усовершенствованного итерационного метода приращений параметров для расчёта линзообразных пневматических сооружений с учётом нелинейных факторов.

**Методы исследования.** При расчёте линзообразных мембранно-пневматических покрытий возникает необходимость учитывать выраженные геометрические и физические нелинейности. Традиционные методы строительной механики не всегда позволяют получить достоверные результаты для подобных систем. [7-9]. В инженерной практике для решения задач этого класса применяются три основных подхода: метод конечных элементов (МКЭ), метод последовательных нагружений и итерационные алгоритмы типа Ньютона–Рафсона.

Каждый из перечисленных методов имеет как достоинства, так и ограничения. МКЭ отличается универсальностью, но при моделировании больших деформаций требует значительных вычислительных ресурсов и усложняет интерпретацию результатов. [10-12]. Алгоритм Ньютона–Рафсона обеспечивает быструю сходимость, однако его эффективность во многом зависит от выбора корректного начального приближения. [13-15]. Метод последовательных нагружений демонстрирует высокую устойчивость, но при малом числе шагов накапливает заметную погрешность [16-18].

Таким образом, для рассматриваемой задачи требуется такой метод, который сочетал бы устойчивость вычислений и достаточную точность при разумной трудоёмкости. В настоящей работе предлагается использовать усовершенствованный итерационный метод приращений параметров, позволяющий проводить расчёт линзообразных пневматических сооружений с учётом нелинейных факторов.

Математическая постановка задачи сводится к операторному уравнению:

$$A(X, Y) = P, \quad (1)$$

где  $X$  – варьируемые параметры системы,  $Y$  – функции, описывающие накопления деформаций, изменения геометрии и свойств материала, а  $P$  – внешние воздействия.

Для численного решения применяется метод последовательных нагружений с использованием процедур Эйлера и Эйлера–Коши.

### 1. Приближение первого порядка (метод Эйлера):

$$y_{n+1} = y_n + h \int (x_n, y_n), \quad (2)$$

где  $h$  – шаг нагружения,  $n$  – номер итерации.

### 2. Приближение второго порядка (метод Эйлера–Коши):

$$y_{n+1} = y_n + \frac{h}{2} \left[ \int (x_n, y_n) + \int (x_{n+1}, y_n + h \int (x_n, y_n)) \right] \quad (3)$$

Данный вариант позволяет существенно уменьшить погрешность вычислений и повысить устойчивость итерационного процесса.

**3. Расширенный алгоритм:** В случае высоких уровней нелинейности используется уточнение третьего порядка, что позволяет достичь точности до  $O(h^4)$ , В таком виде метод может быть применён для расчёта мембранных покрытий больших пролётов при значительных нагрузках.

Для практического применения разработана программа «Расчёт пневматических сооружений с учётом нелинейных факторов». В её основе лежит численная процедура Эйлера–Коши третьего порядка с числом итераций до 30, а также формула приращения давления в пневмолинзе и универсальное уравнение состояния газа. Программа позволяет моделировать влияние как геометрической, так и физической нелинейности. Особое

внимание уделено корректному учёту работы воздуха внутри оболочки, что критически важно для пневматических систем.

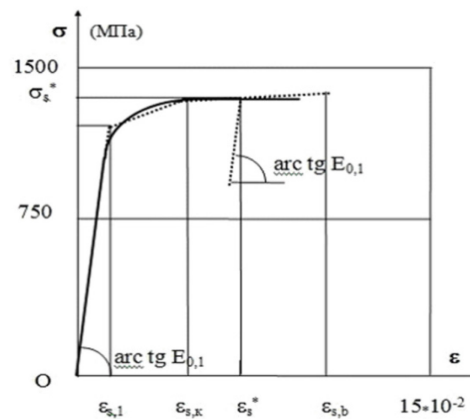
**Обсуждение результатов.** Численные эксперименты показали, что при пролёте 60 м геометрическая нелинейность мембран составляет порядка 7%, а физическая — около 6%. Для проектировщика это означает, что применение линейных методов расчёта приведёт к заметному занижению деформаций и, как следствие, к потенциальной недооценке нагрузочной способности конструкции.

Особенность результатов заключается в том, что влияние внутреннего давления проявляется двояко: оно одновременно увеличивает несущую способность и снижает уровень нелинейности. Таким образом, регулируя величину давления, можно добиваться оптимальных параметров работы конструкции.

**Таблица 1. Результаты исследования тестовой задачи на геометрическую нелинейность**  
**Table 1. Results of the test problem on geometric nonlinearity**

| Число итераций<br>Number of iterations | Избыточное давление (Па)<br>Excess pressure (Pa) | Отклонение, %<br>Deviation, % |
|--|--|-------------------------------|
| $S_k = 1$                              | 487,36   | -38,8                         |
| $S_k = 3$                              | 373,46   | -6,3                          |
| $S_k = 25$                             | 351,11   | —                             |

Для мембранного пояса физическая нелинейность определялась по диаграмме «напряжение–деформация» рис. 3.



**Рис. 3 – Диаграмма напряжений и деформаций мембран покрытия пневматического сооружения**

**Fig. 3 – Diagram of stresses and deformations of the pneumatic structure's membrane cover**

Дополнительно проведено исследование пролётов различной длины табл. 2.

**Таблица 2. Сравнительная оценка геометрической и физической нелинейности при различных пролётах**

**Table 2. Comparative assessment of geometric and physical nonlinearity at different flight heights**

| Пролёт, м<br>Span, m | Геометрическая нелинейность, %<br>Geometric nonlinearity, % | Физическая нелинейность, %<br>Physical nonlinearity, % | Характеристика поведения системы<br>System behavior characteristics  |
|----------------------|---|--|--|
| 60                   | 7   | 6  | Нелинейные эффекты умеренные, расчёт устойчив Nonlinear effects are moderate, the calculation is stable                        |
| 80                   | 11  | 9  | Проявления нелинейности усиливаются, требуется больше итераций Nonlinearity becomes more pronounced, requiring more iterations |
| 100                  | 15  | 13   | Значительная нелинейность, необходим мелкий шаг нагружения Significant nonlinearity, requires a small loading step             |

Результаты показывают, что с ростом пролёта линзообразного покрытия влияние нелинейности возрастает, что подтверждает необходимость применения специализированных численных методов.

**Вывод.** Проведённый анализ подтвердил необходимость учёта нелинейных факторов при проектировании линзообразных мембранно-пневматических покрытий. Применение усовершенствованного итерационного метода приращений параметров обеспечивает баланс между точностью и вычислительной сложностью. Разработанный программный комплекс может быть рекомендован как инструмент для инженерных расчётов и научных исследований в области пневматических сооружений.

Практическая значимость работы заключается в возможности оптимизации проектных решений: снижения расхода материалов, сокращения сроков возведения и повышения надёжности объектов различного назначения — от спортивных арен до временных павильонов.

#### **Библиографический список:**

1. Игнатъев В.А. Расчет мембранно-пневматических сооружений с учетом нелинейных факторов / В.А. Игнатъев // Вестник СГАУ.- 2004.-№ 4.- С. 43-45.
2. Игнатъев В.А., Ким А.Ю. Экспериментальное и теоретическое исследование мембранно-пневматических сооружений / В.А. Игнатъев, А.Ю. Ким // Вестник СГАУ. 2005.- № 1.- С. 37-39.
3. Ким А.Ю. Итерационный метод приращений параметров в теории расчета нелинейных мембранно-пневматических систем / А.Ю. Ким.- Саратов: Изд-во СГТУ, 2005. - 188 с.
4. Ким А.Ю. Итерационный метод приращений параметров для расчёта нелинейных мембранно-пневматических систем с учётом упругой работы воздуха// Вестник СГАУ.- 2005.- № 1.- С. 39-42.
5. Петров В.В. Метод последовательных нагружений в нелинейной теории пластинок и оболочек / В.В. Петров.- Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1975. - 118 с.
6. Пирумов У.Г. Численные методы / У.Г. Пирумов.- М.: Изд-во Дрофа, 2003. - 224 с.
7. Ким А.Ю., Амоян М.Ф., Хапилин В.Е. Статический расчет на устойчивость линзообразного мембранно-пневматического покрытия сооружения // Строительная механика и расчет сооружений. 2022. № 1. С. 14–20. DOI: 10.37538/0039-2383.2022.1.14.20
8. Нургазиев Р.Б. Статический расчет пространственных мембранно-стержневых систем с учетом геометрической и конструктивной нелинейности автореферата по ВАК РФ 05.23.17: автореферат дис. кан. тех.наук. – Волгоград: 2004. – 17 с.
9. Нургазиев Р.Б. Статический расчет пространственных мембранно-стержневых систем с учетом геометрической и конструктивной нелинейности: диссертация. – Волгоград: 2004. – 17 с.
10. Полников, С.В. Применение шаговых методов с применением на шаге МКЭ для расчета большепролетных пневматических сооружений [Текст] / С.В. Полников, А.Ю. Ким [и др.] // Научная дискуссия: вопросы технических наук : сб. ст. по материалам XL международной заочной науч.-практ. конф., г. Москва, ноябрь 2015 г. - М., 2015. - № 11 (29). - С. 50-54.
11. Полников, С.В. Использование шаговых методов с применением на шаге численной процедуры Рунге-Кутты четвертого порядка точности при расчете нелинейных пневматических сооружений [Текст] / А.Ю. Ким, С.В. Полников // Перспективы развития науки и образования : сб. науч. тр. по материалам IV междунар. науч.-практ. конф., г. Москва, 29 апр. 2016 г. - М., 2016. - С. 102-104.
12. Gantes, C., & Connor, J.J. Structural Analysis of Pneumatic Membrane Structures // International Journal of Solids and Structures. – 2017. – Vol. 124–125. – P. 112–124. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2017.04.002.
13. Zhang, L., & Zhou, J. Nonlinear finite element analysis of inflatable membrane structures // Thin-Walled Structures. – 2018. – Vol. 132. – P. 320–330. DOI: 10.1016/j.tws.2018.09.011.
14. Rizzo, F., & Orlando, A. Numerical modeling of large-span pneumatic structures under dynamic loads // Engineering Structures. – 2020. – Vol. 209. – P. 109913. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.109913.
15. Khandelwal, R.S., & El-Shafie, A.H. Advances in analysis of membrane and inflatable structures: A state-of-the-art review // Applied Sciences. – 2021. – Vol. 11 (22). – P. 10643. DOI: 10.3390/app112210643.
16. Chen, Y., Li, H., & Wang, Z. Experimental and numerical study of air-supported membrane structures with nonlinear material behavior // Journal of Constructional Steel Research. – 2022. – Vol. 191. – P. 107228. DOI: 10.1016/j.jcsr.2021.107228.
17. Oliveira, P., & Pascoal, A. Geometric nonlinearity effects in large-span pneumatic domes: Simulation and validation // Journal of Building Engineering. – 2023. – Vol. 64. – P. 105696. DOI: 10.1016/j.jobeb.2023.105696.
18. Ким А.Ю., Амоян М.Ф., Хапилин В.Е. Численное исследование влияния отдельных стоек в линзах на работу нелинейных линзообразных мембранно-пневматических систем шаговым методом.

#### References:

1. Ignatiev V.A. Calculation of membrane-pneumatic structures taking into account nonlinear factors / V.A. Ignatiev. *Bulletin of SSAU*. 2004;4: 43-45. (In Russ)
2. Ignatiev V.A., Kim A.Yu. Experimental and theoretical study of membrane-pneumatic structures / V.A. Ignatiev, A.Yu. Kim. *Bulletin of SSAU*. 2005; 1: 37-39. (In Russ)
3. Kim A.Yu. Iterative method of parameter increments in the theory of calculating nonlinear membrane-pneumatic systems / A.Yu. Kim. - Saratov: *Publishing house of SSTU*, 2005:188 p. (In Russ)
4. Kim A.Yu. Iterative method of parameter increments for calculating nonlinear membrane-pneumatic systems taking into account the elastic work of air. *Bulletin of SSAU*. 2005; 1:39-4. (In Russ)
5. Petrov V.V. Method of successive loadings in the nonlinear theory of plates and shells / V.V. Petrov. - Saratov: Publishing house of Saratov University, 1975:118 p. (In Russ)
6. Pirumov U.G. Numerical methods / U.G. Pirumov. - Moscow: Publishing house Drofa, 2003; 224 p. (In Russ)
7. Kim A.Yu., Amoyan M.F., Khapilin V.E. Static analysis of the stability of a lenticular membrane-pneumatic coating of a structure. *Structural mechanics and calculation of structures*. 2022;1:14–20. DOI: 10.37538/0039-2383.2022.1.14.20 (In Russ)
8. Nurgaziyev R.B. Static calculation of spatial membrane-rod systems taking into account geometric and structural nonlinearity of the abstract of the thesis according to the Higher Attestation Commission of the Russian Federation 05.23.17: abstract of the dissertation of the Cand. of Technical Sciences. – Volgograd: 2004:17 p. (In Russ)
9. Nurgaziyev R.B. Static calculation of spatial membrane-rod systems taking into account geometric and structural nonlinearity: dissertation. – Volgograd: 2004: 17 p. (In Russ)
10. Polnikov, S.V. Application of step methods with the application of the FEM step for the calculation of large-span pneumatic structures [Text] / S.V. Polnikov, A.Yu. Kim [et al.] // Scientific discussion: issues of technical sciences: collection of articles based on the materials of the XL international correspondence scientific and practical conf., Moscow, November 2015. - M., 2015;11 (29):50-54. (In Russ)
11. Polnikov, S.V. Use of step methods with the application of the fourth-order Runge-Kutta numerical procedure at the step in the calculation of nonlinear pneumatic structures [Text] / A.Yu. Kim, S.V. Polnikov // Prospects for the development of science and education: collection of scientific papers based on the materials of the IV international. scientific and practical conf., Moscow, April 29. 2016 - M., 2016;102-104. (In Russ)
12. Gantes, C., & Connor, J.J. Structural Analysis of Pneumatic Membrane Structures. *International Journal of Solids and Structures*. 2017; 124–125:112–124. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2017.04.002.
13. Zhang, L., & Zhou, J. Nonlinear finite element analysis of inflatable membrane structures. *Thin-Walled Structures*. 2018;132: 320–330. DOI: 10.1016/j.tws.2018.09.011.
14. Rizzo, F., & Orlando, A. Numerical modeling of large-span pneumatic structures under dynamic loads. *Engineering Structures*. 2020;209:109913. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.109913.
15. Khandelwal, R.S., & El-Shafie, A.H. Advances in analysis of membrane and inflatable structures: A state-of-the-art review. *Applied Sciences*;2021:11 (22):10643. DOI: 10.3390/app112210643.
16. Chen, Y., Li, H., & Wang, Z. Experimental and numerical study of air-supported membrane structures with nonlinear material behavior. *Journal of Constructional Steel Research*. 2022;191:107228. DOI: 10.1016/j.jcsr.2021.107228.
17. Oliveira, P., & Pascoal, A. Geometric nonlinearity effects in large-span pneumatic domes: Simulation and validation. *Journal of Building Engineering*. 2023; 64: 105696. DOI: 10.1016/j.jobbe.2023.105696.
18. Kim A.Yu., Amoyan M.F., Khapilin V.E. Numerical study of the effect of individual racks in lenses on the operation of nonlinear lenticular membrane-pneumatic systems by the step method. *Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences*. 2022;49(1):122-132. (In Russ) DOI.org/10.21822/2073-6185-2022-49-1-122-132

#### Сведения об авторе:

Хапилин Виктор Евгеньевич, преподаватель-исследователь, кафедра «Строительные материалы конструкции и технологии»; [khapilin2010@yandex.ru](mailto:khapilin2010@yandex.ru)

#### Information about author:

Viktor E. Khapilin, Researcher, Department of Building Materials, Construction and Technology; [khapilin2010@yandex.ru](mailto:khapilin2010@yandex.ru)

#### Конфликт интересов/Conflict of interests.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов/The author declare that there are no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received. 08.07.2025

Одобрена после рецензирования/Reviced. 24.08.2025

Принята в печать/Accepted for publication.08.10.2025

**Исследование числа разнотипных элементов фермы**  
**А.К. Юсупов, Х.М. Муселемов, Р.И. Вишталов, З.А. Гаджиев**  
Дагестанский государственный технический университет,  
367015, г. Махачкала, пр. И.Шамиля,70, Россия

**Резюме. Цель.** Целью исследования является разработка алгоритма определения оптимального числа разнотипных элементов, которые обеспечат минимум стоимости конструкций. В статье приведены конкретные вычисления по оптимизации числа разнотипных элементов фермы пролётом 24 метра, 30 метров и 36 метров. **Метод.** Исследование основано на применении численно-аналитических методах расчета расхода стали в зависимости от числа разнотипных элементов фермы. **Результат.** Рассмотренные конструктивные и расчётные схемы позволяют опеределить оптимальное число разнотипных элементов фермы, которое обеспечивает минимум стоимости стержневой системы (фермы). Результаты приводятся в виде графиков и таблиц **Вывод.** Результаты проведенного исследования позволяют назначить оптимальное число разнотипных элементов еще на стадии компоновки фермы, имеющей различные пролёты.

**Ключевые слова:** фермы, шпренгельная система, решётка фермы, оптимальное число, панели, расход стали, графики, таблицы

**Для цитирования:** А.К. Юсупов, Х.М. Муселемов, Р.И. Вишталов, З.А. Гаджиев. Исследование числа разнотипных элементов фермы. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025;52(4):238-246. DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-4-238-246

**Study of the number of different types of truss elements**  
**A.K. Yusupov, Kh.M. Muselemov, R.I. Vishtalov, Z.A. Gadzhiev**  
Daghestan State Technical University,  
70 I. Shamilya Ave., Makhachkala 367015, Russia

**Abstract. Objective.** The purpose of this study is to develop an algorithm for determining the optimal number of different types of elements that will minimize the cost of structures. The article presents specific calculations for optimizing the number of different types of truss elements for spans of 24 meters, 30 meters, and 36 meters. **Method.** The study is based on the application of numerical and analytical methods for calculating steel consumption depending on the number of different types of truss elements. **Result.** The considered design and calculation schemes allow us to determine the optimal number of different types of truss elements that minimizes the cost of the rod system (truss). The results are presented in the form of graphs and tables. **Conclusion.** The results of this study allow us to determine the optimal number of different types of elements even at the design stage of trusses with different spans.

**Keywords:** trusses, truss system, truss lattice, optimal number, panels, steel consumption, graphs, tables

**For citation:** A.K. Yusupov, Kh.M. Muselemov, R.I. Vishtalov, Z.A. Gadzhiev. Study of the number of different types of truss elements. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2025;52(4): 238-246. (In Russ) DOI:10.21822 /2073-6185-2025-52-4-238-246

**Введение.** Проектирование фермы начинают с ее компоновки [1-3,5]. На этой стадии выбирают статическую схему и очертание фермы, назначают вид решетки и определяют

генеральные размеры. Затем производят статический расчет фермы, подбор сечений элементов фермы, расчет и конструирование ее узлов [4, 6, 7, 9].

По напряженному состоянию фермы можно разделить на обычные и фермы с регулируемым напряжением – с затяжками (шпренгелями), со смещением уровня опор в неразрезных фермах и другие.

Генеральными размерами фермы являются её пролёт и высота. Пролёт выбирают в зависимости от технологического процесса, который протекает в здании (расстановка оборудования, назначения здания, организация потоков и т.п.). Если нет ограничений технологического характера, пролет назначается из экономических соображений. В целях типизации пролеты ферм унифицируются и принимаются кратными модулю 6 м, т.е. 18, 24, 30, 36, 42 м. В отдельных случаях допускается модуль 3 м.

Высота фермы в середине пролета определяется условиями минимального веса, требуемой жесткости, характеризуемой заданным прогибом, и габаритами при перевозке, как правило, железнодорожным транспортом (наибольший габарит по вертикали 3,85 м). Практически из условий стандартизации геометрической схемы высоту стропильных ферм рационально принимать одинаковой для всех ферм различных пролетов: в типовых фермах трапециoidalного очертания – 2,2 м (между обушками на разбивочной оси колонны) и в фермах с параллельными поясами 3,15 м.

По величине максимальных усилий условно различают легкие одностенчатые фермы с сечениями элементов из простых прокатных или гнутых профилей [10-12] (при усилиях в стержнях  $N \leq 3000$  кН) и тяжелые фермы ( $N > 3000$  кН). Стержни тяжелых ферм отличаются от легких более мощными сечениями, составленные из нескольких элементов, и обычно проектируются двустенчатыми. В качестве легких ферм обычно используются стропильные фермы (фермы кровельного покрытия).

**Постановка задачи.** Целью исследования является разработка методики определения оптимального числа разнотипных элементов стержней фермы, которая обеспечивает минимальный расход стали.

При работе ферм с элементами из уголков или тавров принимается допущение, что все стержни соединены в узлах шарнирно, оси всех стержней прямолинейны, расположены в одной плоскости и пересекаются в узле в одной точке.

**Методы исследования.** После предварительного определения опорных реакций фермы, усилия в элементах стропильных ферм от неподвижной нагрузки определяются, как правило, графическим методом – путем построения диаграммы Максвелла-Кремоны или аналитическим методом для всех загружений отдельно. Для симметричного нагружения диаграмма усилий строится для половины фермы.

При наличии опорных моментов строится диаграмма усилий от единичного момента  $M_1$ , приложенного к левой опоре. Зеркальное отображение этих усилий дает значение усилий в стержнях фермы от единичного момента, приложенного к правой опоре. Единичный момент заменяется эквивалентной парой сил  $H = M_1/h_0$  с плечом  $h_0$ . Умножая значение усилий в стержнях фермы от единичных моментов соответственно на  $M_l$  и  $M_n$ , получаем фактические усилия в стержнях. Усилия от каждого нагружения оформляются в табличной форме. Лучше всего расчет ферм выполнять на компьютере, воспользовавшись любой из известных программ. Для подбора сечений элементов ферм необходимо получить для каждого элемента максимально возможное усилие при самом невыгодном сочетании нагрузок.

В случае приложения нагрузок вне узлов фермы её пояса рассчитываются как неразрезные балки на совместное действие продольных усилий и изгибающего момента. Значение изгибающего момента от сосредоточенной силы  $F$  приближенно определяется по формуле  $M = 0,9Fd/4$ , где коэффициент 0,9 учитывает неразрезность пояса;  $d$  – длина панели. Ферма состоит из различных стержней. При этом число разнотипных элементов стержней фермы существенно влияет на расход стали т.е. на собственный вес конструкции и её стоимость.

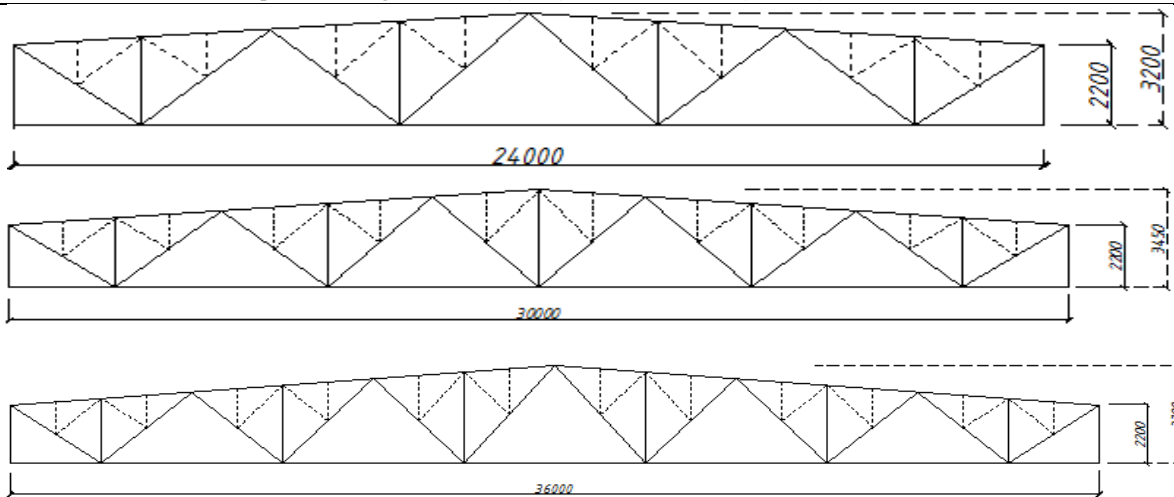


Рис. 1 – Конструктивные схемы шпренгельных ферм  
 Fig. 1 – Structural diagrams of truss trusses

Здесь и далее пунктирными линиями показаны шпренгельные элементы (рис.1).

Введение шпренгельных элементов в обычные фермы: уменьшает расчетные длины соответствующих стержней и увеличивает критические силы; обеспечивает узловую передачу нагрузки от перекрытия (плит). Все это приводит к повышению эффективности шпренгельных ферм (уменьшается собственный вес фермы)

Алгоритм определения усилий в стержнях фермы, который был изложен в статье [13], остаётся без изменения и для ферм, который мы будем рассматривать далее. Здесь для определения усилий в стержнях фермы, как и ранее, используются методы строительной механики.

**Обсуждение результатов.** Расчетные усилия в стержнях шпренгельной фермы.

При  $L = 24$  м.  $k=1$  (к-коэффициент характеризующий степень нагрузки)

$F_1 = F_2 = F_3 = 37 \cdot 1 = 37$  Кн  $F_4 = 40$  Кн  $F_5 = 80$  Кн --1-й вариант снеговой нагрузки [8]. Усилия от вариантов снеговой нагрузки при  $k=1$  приведены в табл. 1.

Таблица 1. Усилия от вариантов снеговой нагрузки  
 Table 1. Efforts from snow load variants

| Элемент<br>Element         | № стержней<br>No. of rods | Усилия от постоянной нагрузки<br>Efforts from constant load | Усилия от снеговой нагрузки<br>Efforts from snow load |             |             | Усилия от опорных моментов<br>Efforts from support moments<br>$S_1$ от $M_1$ |
|----------------------------|---------------------------|---|---|-------------|-------------|--|
|                            |                           |   | 1-й вариант   | 2-й вариант | 3-й вариант |  |
| Верхний пояс<br>Upper belt | 1-3                       | -187  | -190.3  | -208.64     | -243.64     | -0,177   |
|                            | 3-5                       | -187  | -190.3  | -208.64     | -243.64     | -0,376   |
|                            | 5-7                       | -250  | -309.76   | -339.6      | -396.57     | -0,095   |
|                            | 7-8                       | -320  | -309.76   | -339.6      | -396.57     | -0,048   |
| Стойки<br>Racks            | 1-2                       | -200  | -194  | -177        | -238        | 0  |
|                            | 3-4                       | -40   | -37   | -42         | -37         | -0,125   |
|                            | 6-7                       | -30   | -68   | -36         | -97         | 0,063  |
| Нижний пояс<br>Lower belt  | 1-3                       | 0   | 0   | 0           | 0           | 0,375  |
|                            | 3-6                       | 120   | 312.573   | 314.491     | 401.198     | 0,175  |
|                            | 6-9                       | 155   | 362.584   | 430.853     | 433.294     | 0,07   |
| Раскосы<br>Braces          | 1-4                       | 108   | 238   | 204.545     | 304.545     | 0,175  |
|                            | 4-5                       | -72   | -173.65   | -112.32     | -216.86     | -0,301   |
|                            | 5-6                       | 45  | 115   | 53.4848     | 65.7163     | -0,113   |
|                            | 6-8                       | -28   | -44.231   | -13.371     | -28.572     | 0,077  |

Расчётные усилия в стержнях шпренгельной фермы при  $k=1$  приведены в табл. 2.

**Таблица 2. Расчётные усилия в стержнях шпренгельной фермы**  
**Table 2. Calculated forces in the truss rods**

| Расчетные усилия Calculated forces |                          |                            |                       |
|------------------------------------|--------------------------|----------------------------|-----------------------|
| № усилий<br>No. of efforts         | Растяжение<br>Stretching | № усилий<br>No. of efforts | Сжатие<br>Compression |
| ---                                | ---                      | 1+3 <sup>й</sup>           | -438                  |
| ---                                | ---                      | 1+3 <sup>й</sup>           | -438                  |
| ---                                | ---                      | 1+3 <sup>й</sup>           | -730                  |
| ---                                | ---                      | 1+3 <sup>й</sup>           | -800                  |
| ---                                | ---                      | 1+3 <sup>й</sup>           | -438                  |
| ---                                | ---                      | 1+3 <sup>й</sup>           | -85                   |
| ---                                | ---                      | 1+3 <sup>й</sup>           | -120                  |
| 0                                  | 0                        | ---                        | ---                   |
| 1+3 <sup>й</sup>                   | 525                      | ---                        | ---                   |
| 1+3 <sup>й</sup>                   | 588                      | ---                        | ---                   |
| 1+3 <sup>й</sup>                   | 415                      | ---                        | ---                   |
| ---                                | ---                      | 1+3 <sup>й</sup>           | -288                  |
| 1+1 <sup>й</sup>                   | 160                      | ---                        | ---                   |
| ---                                | ---                      | 1+1 <sup>й</sup>           | -71                   |

При  $L = 30$  м.  $k=1$

$F_1 = F_2 = F_3 = 37 * 1 = 37$  Кн  $F_4 = 40 * 1 = 40$  Кн  $F_5 = 78$  Кн--1-й вариант снеговой нагрузки.  
 Усилия от вариантов снеговой нагрузки при  $k=1$  приведены в табл. 3.

**Таблица 3. Усилия от вариантов снеговой нагрузки**  
**Table 3. Efforts from snow load variants**

| Элемент<br>Element         | № стержней<br>No. of rods | Усилия от постоянной нагрузки<br>Efforts from constant load | Усилия от снеговой нагрузки<br>Efforts from snow load |             |             | Усилия от опорных моментов<br>Efforts from support moments<br>$S_1$ от $M_1$ |
|----------------------------|---------------------------|---|---|-------------|-------------|--|
|                            |                           |   | 1-й вариант   | 2-й вариант | 3-й вариант |  |
| Верхний пояс<br>Upper belt | 1-3                       | -200  | -260  | -188        | -125        | -0,443   |
|                            | 3-5                       | -200  | -260  | -188        | -125        | -0,413   |
|                            | 5-7                       | -310  | -470  | -335        | -165        | -0,257   |
|                            | 7-8                       | -310  | -470  | -335        | -165        | -0,254   |
|                            | 8-9                       | -310  | -470  | -313        | -141        | -0,119   |
| Стойки<br>Racks            | 1-2                       | -200  | -232  | -192        | -137        | 0  |
|                            | 3-4                       | -38   | -48   | -48         | -44         | -0,06  |
|                            | 7-6                       | -24   | -44   | -36         | 0           | -0,016   |
|                            | 9-10                      | -75   | -96   | -62         | -28         | -0,016   |
| Нижний пояс<br>Lower belt  | 2-4                       | 0   | 0   | 0           | 0           | 0,453  |
|                            | 4-6                       | 280   | 390   | 285         | 177         | 0,313  |
|                            | 6-9                       | 340   | 500   | 340         | 154         | 0,124  |
| Раскосы<br>Braces          | 1-4                       | 185   | 155   | 232         | 320         | -0,034   |
|                            | 4-5                       | -157  | -181  | -133        | -71         | 0,136  |
|                            | 5-6                       | 85  | 163   | 65          | 120         | -0,122   |
|                            | 6-8                       | -32   | -46   | -11         | -78         | 0,119  |
|                            | 8-9                       | 20  | 63  | 43          | 19          | 0,119  |

Расчётные усилия в стержнях шпренгельной фермы при  $k=1$  приведены в табл. 4.

**Таблица 4. Расчётные усилия в стержнях шпренгельной фермы**  
**Table 4. Calculated forces in the truss rods**

| Расчетные усилия Calculated forces |                          |                            |                       |
|------------------------------------|--------------------------|----------------------------|-----------------------|
| № усилий<br>No. of efforts         | Растяжение<br>Stretching | № усилий<br>No. of efforts | Сжатие<br>Compression |
| ---                                | ---                      | 1+1 <sup>й</sup>           | -460                  |
| ---                                | ---                      | 1+1 <sup>й</sup>           | -460                  |
| ---                                | ---                      | 1+1 <sup>й</sup>           | -780                  |
| ---                                | ---                      | 1+1 <sup>й</sup>           | -780                  |
| ---                                | ---                      | 1+1 <sup>й</sup>           | -780                  |
| ---                                | ---                      | 1+1 <sup>й</sup>           | -432                  |
| ---                                | ---                      | 1+1 <sup>й</sup>           | -86                   |
| ---                                | ---                      | 1+1 <sup>й</sup>           | -68                   |
| ---                                | ---                      | 1+1 <sup>й</sup>           | -171                  |
| 0                                  | 0                        | 0                          | 0                     |
| 1+1 <sup>й</sup>                   | 670                      | ---                        | ---                   |
| 1+1 <sup>й</sup>                   | 840                      | ---                        | ---                   |
| 1+3 <sup>й</sup>                   | 505                      | ---                        | ---                   |
| ---                                | ---                      | 1+1 <sup>й</sup>           | -338                  |
| 1+1 <sup>й</sup>                   | 248                      | ---                        | ---                   |
| ---                                | ---                      | 1+3 <sup>й</sup>           | -110                  |
| 1+1 <sup>й</sup>                   | 83                       | ---                        | ---                   |

При **L = 36 м. κ=1**

$F_1 = F_2 = F_3 = F_4 = 37 \cdot 1 = 37 \text{ Кн}$ ,  $F_5 = 40 \text{ Кн}$ ,  $F_6 = 42 \text{ Кн}$  -- 1-й вариант снеговой нагрузки. Усилия от вариантов снеговой нагрузки при  $\kappa=1$  приведены в табл.5.

**Таблица 5. Усилия от вариантов снеговой нагрузки**  
**Table 5. Efforts from snow load variants**

| Элемент<br>Element         | № стержней<br>No. of rods | Усилия от постоянной нагрузки<br>Efforts from constant load | Усилия от снеговой нагрузки<br>Efforts from snow load |             |             | Усилия от опорных моментов<br>Efforts from support moments<br>S <sub>1</sub> от M <sub>1</sub> |
|----------------------------|---------------------------|---|---|-------------|-------------|--|
|                            |                           |   | 1-й вариант   | 2-й вариант | 3-й вариант |  |
| Верхний пояс<br>Upper belt | 1-3                       | -220  | -241  | -240        | -174        | -0,413   |
|                            | 3-5                       | -220  | -241  | -240        | -174        | -0,413   |
|                            | 5-7                       | -350  | -485  | -468        | -308        | -0,333   |
|                            | 7-8                       | -350  | -485  | -468        | -308        | -0,333   |
|                            | 8-10                      | -430  | -542  | -497        | -270        | -0,292   |
|                            | 10-11                     | -430  | -542  | -500        | -270        | -0,292   |
| Стойки<br>Racks            | 1-2                       | -200  | -230  | -234        | -174        | 0  |
|                            | 3-4                       | -30   | -37   | -42         | -37         | 0  |
|                            | 7-6                       | -15   | -50   | -26         | -20         | -0,022   |
|                            | 9-10                      | -45   | -77   | -63         | -18         | 0,019  |
| Нижний пояс<br>Lower belt  | 2-4                       | 0   | 0   | 0           | 0           | 0,45   |
|                            | 4-6                       | 72  | 400   | 395         | 273         | 0,38   |
|                            | 6-9                       | 157   | 532   | 500         | 287         | 0,09   |
|                            | 9-12                      | 200   | 490   | 440         | 240         |  |
| Раскосы<br>Braces          | 1-4                       | 160   | 300   | 298         | 212         | 0,047  |
|                            | 4-5                       | -140  | -213  | -204        | -135        | -0,042   |
|                            | 5-6                       | 85  | 107   | 93          | 45          | 0,067  |
|                            | 6-8                       | -44   | -70   | -48         | -28         | -0,03  |
|                            | 8-9                       | 15  | 10  | 4           | 25          | 0,027  |
|                            | 9-11                      | -58   | -92   | -85         | -46         | -0,02  |

Расчётные усилия в стержнях шпренгельной фермы при  $k=1$  приведены в табл. 6.

**Таблица 6. Расчётные усилия в стержнях шпренгельной фермы**

**Table 6. Calculated forces in the truss rods**

| Расчетные усилия Calculated forces |                          |                            |                       |
|------------------------------------|--------------------------|----------------------------|-----------------------|
| № усилий<br>No. of efforts         | Растяжение<br>Stretching | № усилий<br>No. of efforts | Сжатие<br>Compression |
| ---                                | ---                      | 1+1 <sup>й</sup>           | -461                  |
| ---                                | ---                      | 1+1 <sup>й</sup>           | -461                  |
| ---                                | ---                      | 1+1 <sup>й</sup>           | -835                  |
| ---                                | ---                      | 1+1 <sup>й</sup>           | -835                  |
| ---                                | ---                      | 1+1 <sup>й</sup>           | -972                  |
| ---                                | ---                      | 1+1 <sup>й</sup>           | -972                  |
| ---                                | ---                      | 1+2 <sup>й</sup>           | -434                  |
| ---                                | ---                      | 1+2 <sup>й</sup>           | -72                   |
| ---                                | ---                      | 1+1 <sup>й</sup>           | -65                   |
| ---                                | ---                      | 1+1 <sup>й</sup>           | -122                  |
| 0                                  | 0                        | 0                          | 0                     |
| 1+1 <sup>й</sup>                   | 472                      | ---                        | ---                   |
| 1+1 <sup>й</sup>                   | 689                      | ---                        | ---                   |
| 1+1 <sup>й</sup>                   | 690                      | ---                        | ---                   |
| 1+1 <sup>й</sup>                   | 460                      | ---                        | ---                   |
| ---                                | ---                      | 1+1 <sup>й</sup>           | -353                  |
| 1+1 <sup>й</sup>                   | 192                      | ---                        | ---                   |

Стоимость металлоконструкций складывается из следующих составных частей: стоимости проектирования, зависящей от вида конструкций, их сложности и повторяемости; стоимости металла и других материалов (электроды, метизы); издержек производства, зависящих от механовооруженности завода изготовителя, трудоемкости, серийности изготовления конструкций; транспортные расходы на перевозку конструкций; стоимости монтажа. Основные процессы строительства делятся: на заводские и на стройплощадке.

Примерное распределение стоимости по процессам выглядит так (в %) табл. 7.

**Таблица 7. Распределение стоимости по процессам**

**Table 7. Cost distribution by processes**

|    |  |         |
|----|--|---------|
| 1. | Проектирование Design                            | 2-3%%   |
| 2. | Сталь и др. материалы/ Steel and other materials | 40-60%% |
| 3. | Изготовление/ Manufacturing                      | 20-25%% |
| 4. | Транспортные расходы/Transportation costs        | 5-7%%   |
| 5. | Монтаж/ Installation                             | 15-25%% |

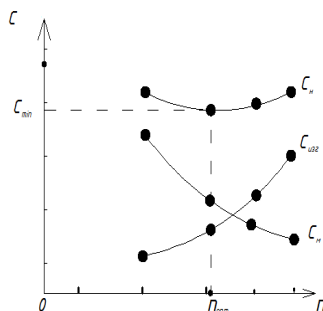
Из табл.7 видно, что основные затраты идут на сталь и др. материалы; изготовление и монтаж. Поэтому с целью снижения стоимости конструкций необходимо экономить сталь путем применения точных расчетов на прочность, устойчивость, жесткость; оптимизации компоновки конструкции (выбор очертания, узлы, отправочные марки и т. д.); снижения собственного веса, применяя высокопрочные стали и преднапряжение.

Экономия можно достичь за счет повышения технологичности изготовления конструкций (оптимизации числа разнотипных элементов и отправочных марок, применения типовые конструкции, перенесение основных операций по изготовлению конструкций на завод, использование современных технологий, автоматизированных технологических линий и т.д.).

Общую стоимость  $C_0$  конструкции можно представить в виде суммы стоимости металла  $C_m$ , стоимости технологических затрат на изготовление  $C_{изг}$ , стоимости на восстановление в случае аварии  $C_{ав}$ :  $C_0=C_m+C_{изг}+C_{ав}$ .

Если же исходить только из начальной стоимости  $C_n$ , то можно сказать, что существует оптимальное число разнотипных элементов, которое обеспечивает минимум начальной стоимости  $C_n$  типовой конструкции (рис. 2).

$C_H = C_M + C_{изг}$ , где  $n$ -число разнотипных элементов, (рис. 2.)



**Рис. 2 – Зависимость расхода металла от количества разнотипных элементов**

**Fig. 2 – Dependence of metal consumption on the number of different types of elements**

В данной статье сравнивается общий вес отправочной марки при различных  $n$  ( $n=3, 4, 5, 6, 7, 9, 11, 13$  и т.д.) и стоимость металла. Стоимость изготовления не приводится так как на форму кривых и на оптимальное значение  $n$  она не влияет, а лишь увеличивает значения координат по оси ординат, поэтому при построении графиков эту стоимость не учитываем.

На рис. 2 приведены три кривые. Нисходящая кривая от начала координат является кривой, показывающей расход материала-  $G$  (кгс) в зависимости от количества разнотипных элементов – $n$ , чем больше разнотипных элементов, тем меньше вес.

Вторая кривая -обратная кривой расхода  $G$ , показывает стоимость материала  $C_M$  в зависимости от количества разнотипных элементов и количества элементов от общего числа элементов отправочной марки, в каждом типе элемента (при  $n=3$ , при  $n=5$  и т. д.).

Третья кривая начальной стоимости получаем графически при суммировании двух кривых расход материала-  $G$  и стоимость материала  $C_M$ , которая необходима для нахождения оптимального числа разнотипных элементов  $n_{опт}$ .

В силу ограниченности объёма статьи здесь приводим не все таблицы расчёта, сохранив только соответствующие графики, которые характеризуют оптимальное число разнотипных элементов, представленных на рис.3-6.

Результаты расчётов элементов фермы при  $L=24$  м приведены в табл.8.

**Таблица 8. Результаты расчётов элементов фермы при  $L=24$  м**

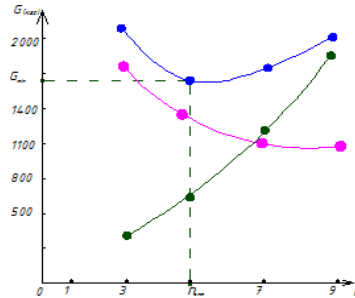
**Table 8. Results of calculations of truss elements at  $L=24$  m**

| Элементы фермы<br>Element  | Длина<br>Length | Погонный вес<br>Linear weight | Вес стержня<br>Rod weight |
|----------------------------|-----------------|-------------------------------|---------------------------|
| Верхний пояс<br>Upper belt | 3               | 23.3                          | 69.9                      |
|                            | 3               | 23.3                          | 69.9                      |
|                            | 3               | 36                            | 108                       |
|                            | 3               | 39.5                          | 118.5                     |
| Стойки Racks               | 2.2             | 10.9                          | 23.98                     |
|                            | 2.5             | 3.44                          | 8.6                       |
|                            | 3               | 5.72                          | 17.16                     |
| Нижний пояс<br>Lower belt  | 3               | 8                             | 24                        |
|                            | 6               | 32.5                          | 195                       |
|                            | 3               | 43.2                          | 129.6                     |
| Раскосы Braces             | 3.75            | 15.1                          | 56.625                    |
|                            | 4.2             | 12.2                          | 51.24                     |
|                            | 4.2             | 8.51                          | 35.742                    |
|                            | 4.4             | 5.38                          | 23.672                    |

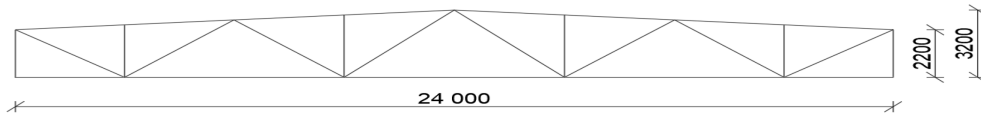
Влияние числа разнотипных элементов на стоимость затрачиваемого материала приведено в табл. 9.

**Таблица 9. Влияние числа разнотипных элементов на стоимость материала**  
**Table 9. The influence of the number of different types of elements on the cost of the material**

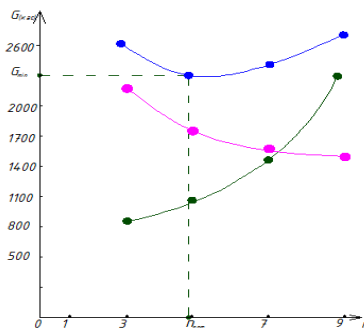
| Общая стоимость отправочной марки обычной фермы Total cost of farm shipping stamp | Число разнотипных элементов Number of different types of elements |        |        |       |
|---|---|--------|--------|-------|
|   | n=3   | n=5    | n=7    | n=9   |
| Вес (кгс) Weight (kgf)  | 390.6   | 282.6  | 238.6  | 235.6 |
| Решетка Grate   | 390.6   | 282.6  | 238.6  | 235.6 |
| Пояса Belts   | 1365  | 975    | 915    | 875   |
| Общий вес (кгс) Total weight (kgf)  | 1756  | 1257.6 | 1153.6 | 1111  |
| Стоимость металла Metal cost, в т.ч.  | 41  | 62     | 71     | 80    |
| в условных единицах in conventional units   | 29  | 42     | 56     | 58    |



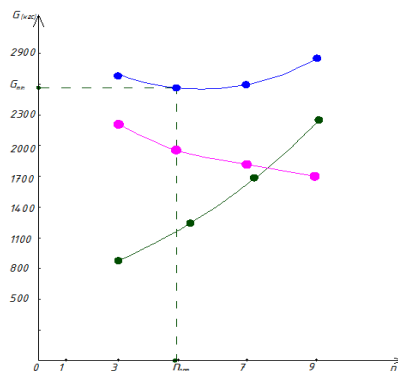
**Рис. 3 – Графическое определение оптимального числа разнотипных элементов при L=24 м**  
**Fig. 3 – Graphical determination of the optimal number of different types of elements for L=24 m**



**Рис. 4 – Конструктивная схема фермы с  $n_{\text{опт}}=5$  а  $G_{\text{min}}=1650$  кгс при L=30 м**  
**Fig. 4 – Structural diagram of a truss with  $n_{\text{opt}}=5$  and  $G_{\text{min}}=1650$  kgf at L=30 m**



**Рис. 5 – Графическое определение  $n_{\text{опт}}$  при L=30 м**  
**Fig. 5 – Graphical definition of  $n_{\text{opt}}$  at L=30 m**



**Рис. 6 – Графическое определение  $n_{\text{опт}}$  при L=36 м**  
**Fig. 6 – Graphical definition of  $n_{\text{opt}}$  at L=36 m**

**Вывод.** По результатам выполненных расчетов можно сделать следующий вывод:

1. Рассмотренный алгоритм определения оптимального числа разнотипных элементов обеспечивает минимум стоимости конструкций.
2. Результаты исследования даны в виде таблиц и графиков, пользуясь которыми можно оптимизировать параметры проектируемой фермы.
3. Изложенная методика может найти применение при проектировании стержневых систем металлических конструкций (оболочки, балочные клетки, фахверки).

#### **Библиографический список:**

1. Металлические конструкции в вопросах, в ответах и в проектировании. А.К. Юсупов, Махачкала, ДГТУ – 2010 г.
2. Металлические конструкции. Под редакцией Е.И. Беленя, Москва, Стройиздат, 1986 г.
3. Металлические конструкции. Под редакцией Ю.И. Кудишин, Москва, Академия, 2008 г.
4. Расчет стальных конструкций. Клыков В.М., Я.М. Лихтарников, Москва, 1995 г.
5. Металлические конструкции. Справочник по редакции Мельникова С.П., Москва, 1982г.
6. Примеры расчета металлических конструкций. Михайлов А., Москва, 1982 г.
7. СП 16.13330.2017 «Стальные конструкции». Свод правил – Москва.- Стройиздат, 2017г. – 126 с.
8. СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия». Свод правил – Москва - Стройиздат, 2016. – 95 с.,
9. Справочник конструктора «Стальные конструкции». Под редакцией Шумакова, Академия, Москва, 2004 г.
10. ГОСТ 8509-93 Уголки стальные горячекатаные равнополочные.
11. ГОСТ 26020-83 Двутавр нормальный (Б).
12. ТУ 14-2-685-86 Тавр (ШТ.)
13. А.К. Юсупов, Х.М. Муселемов, Р.И. Вишталов, З.А. Гаджиев. Оптимизация параметров фермы. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025;52(3):247-254.

#### **References:**

1. Metal Structures: Questions, Answers, and Design. A.K. Yusupov, Makhachkala, DSTU – 2010. (In Russ)
2. Metal Structures. Edited by E.I. Belenya, Moscow, Stroyizdat, 1986. (In Russ)
3. Metal Structures. Edited by Yu.I. Kudishin, Moscow, Academy, 2008. (In Russ)
4. Steel Structure Calculation. V.M. Klykov, Ya.M. Likhtarnikov, Moscow, 1995. (In Russ)
5. Metal Structures. Handbook edited by S.P. Melnikov, Moscow, 1982. (In Russ)
6. Metal Structure Calculation Examples. Mikhailov, Moscow, 1982. (In Russ)
7. SP 16.13330.2017 "Steel Structures." Code of Practice – Moscow. - Stroyizdat, 2017 – 126 p. (In Russ)
8. SP 20.13330.2016 "Loads and Impacts." Code of Practice – Moscow - Stroyizdat, 2016. – 95 p. (In Russ)
9. Designer's Handbook "Steel Structures." Edited by Shumakov, Academy, Moscow, 2004. (In Russ)
10. GOST 8509-93 Hot-Rolled Equal-Flange Steel Angles (In Russ)
11. GOST 26020-83 Normal I-Beam (B) (In Russ)
12. TU 14-2-685-86 I-Beam (ShT) (In Russ)
13. A.K. Yusupov, Kh.M. Muselemov, R.I. Vishtalov, Z.A. Gadzhiev. Optimizing farm parameters. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2025;52(3): 247-254. (In Russ)

#### **Сведения об авторах:**

Абусупян Курашевич Юсупов, доктор технических наук, профессор, кафедра «Строительные конструкции и гидротехнические сооружения»; [hairulla213@mail.ru](mailto:hairulla213@mail.ru)

Хайрулла Магомедмуратович Муселемов, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Строительные конструкции и гидротехнические сооружения»; [hairulla213@mail.ru](mailto:hairulla213@mail.ru)

Раджаб Исабекович Вишталов, кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительные конструкции и гидротехнические сооружения»; [hairulla213@mail.ru](mailto:hairulla213@mail.ru)

Зубаир Абдулмеджидович Гаджиев, студент, [gadzievzubair56@mail.ru](mailto:gadzievzubair56@mail.ru)

#### **Information about the authors:**

Abusupyayn K. Yusupov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Department of Building Structures and Hydraulic Structures; [hairulla213@mail.ru](mailto:hairulla213@mail.ru)

Hairulla M. Muselemov, Dr. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Head of the Department of Building Structures and Hydraulic Structures; [hairulla213@mail.ru](mailto:hairulla213@mail.ru)

Rajab I. Vishtalov, Cand.Sci. (Eng.), Assoc. Prof. Department of Building Structures and Hydrotechnical Structures; [hairulla213@mail.ru](mailto:hairulla213@mail.ru)

Zubair A. Gadzhiev, Student, [gadzievzubair56@mail.ru](mailto:gadzievzubair56@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/Revised 20.09.2025.**

**Принята в печать/Accepted for publication 04.11.2025.**

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

Верстка журнала осуществляется с электронных копий. Используется компьютерная обработка штриховых и полутоновых (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 MicrosoftWord. 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 MicrosoftWord 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 MicrosoftWord 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 MicrosoftWord, CorelDraw, MicrosoftVisio 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 заголовки граф (объясняют значение данных в графах); боковика (первой слева графы) и профграфик. 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 наличию 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 проинформировать 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: aidaesetova@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 MicrosoftWord 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 MicrosoftWord, CorelDraw, MicrosoftVisio 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 Shamilya 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: aidaesetova@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 52– № 4 – 2025.

**HERALD  
OF DAGHESTAN STATE TECHNICAL UNIVERSITY. TECHNICAL SCIENCES**  
Makhachkala, Volume 52, No.4. 2025.

**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](mailto: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 30.12.2025г. Сдано в печать 30.12.2025г.  
Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Гарнитура «Times». Бумага офсетная  
Тираж 500. Усл. п. л. 28.83 Уч. изд. л. 21.21  
Заказ № 1901

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](mailto:Kopyltsow_Pavel@mail.ru)

