

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, № 2, 2025.

ВЕСТНИК

ДАГЕСТАНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА.

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Volume 52, No.2, 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.

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.

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

© Founder and Publisher Daghestan State Technical University, 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, № 2, 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 Института проблем геотермии Дагестанского научного центра РАН, г. Махачкала, РФ.

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

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

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

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

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

Научная рубрика «Информационные технологии и телекоммуникации»

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

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

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

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

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

Мустафаев А.Г., д.т.н., профессор ДГТУ, Махачкала, РФ.

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

Саркаров Т.Э., д.т.н., профессор, зав. кафедрой 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.

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

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

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

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

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, Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашникова, г. Ижевск, РФ. orcid.org/0000-0001-7363-1071

Сопредседатели:

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

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

Члены редакционного совета:

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

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

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

Группы научных специальностей

2.4.8. Машины и аппараты, процессы холодильной и криогенной техники (технические науки)

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

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

2.3.4. Управление в организационных системах (технические науки)

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

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

2.3.7. Компьютерное моделирование и автоматизация проектирования (технические науки)

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

2.1.5. Строительные материалы и изделия (технические науки),

2.1.9. Строительная механика (технические науки)

Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. Том 52, № 2 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

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

СОДЕРЖАНИЕ

Энергетика и электротехника.....	6
Ш.З. Байрамов, О.С. Малинина, А.В. Бараненко. Исследование системы холодоснабжения на базе абсорбционной бромистолитиевой холодильной машины в климатических условиях г. Астрахани с применением солнечной энергии	6
О.В. Евдулов, С.Г. Гасанова, Г.А. Муталипова. Охлаждающее термоэлектрическое устройство для лечения повреждений позвоночника и спинного мозга	18
А.Ю. Иконникова, А.Ю. Баранов, Ю.А. Кравченко, Д.В. Кравченко. Модификация цикла Mixed Fluid Cascade с рекуперацией теплоты обратных потоков рабочих веществ и оптимизированным давлением потока природного газа	27
А.В. Колинко, М.В. Шамаров, А.О. Галанин, И.И. Юрченко, Р.А. Жлобо, А.С. Зайцев. Особенности применения и расчета режимов работы тепловых труб в составе низкотемпературных установок и систем жизнеобеспечения.....	42
М.Ф. Руденко, Ю.В. Шипулина, В.Н. Саинова, Е.В. Андреева. Конструктивные особенности реактора генератора-абсорбера гелиоэнергетических холодильных установок	52
Информационные технологии и телекоммуникации	63
Н.Л. Баламирзоев, <u>В.Б. Мелехин</u> . Метод обработки экспертных данных для построения эмпирических математических моделей сложных систем, функционирующих в нестабильных окружающих средах	63
О.Ю. Башарина, Е.В. Буценко, А.С. Еремеев. Сервис управления и анализа инцидентов информационной безопасности	74
А.И. Дубровина. Гибридный метод моделирования систем искусственного интеллекта для выявления кибератак.....	81
В.А. Егунов. Новый метод определения характеристик блочных алгоритмов	90
А.О. Ефимов. Причины возникновения, классификация и критичность уязвимостей программного обеспечения информационных систем.....	98
Г.И. Качаева, Н.Г. Султанов. Стратегии защиты от угроз безопасности: развитие системы обеспечения кибербезопасности	107
Д.А. Крюкова, С.Д. Шибайкин, В.В. Никулин, С.Р. Байбикова, Н.О. Сурков, В.Ю. Козьякин. Комбинирование систем распознавания и отслеживания аномальных объектов в телекоммуникационных системах	116
И.А. Лоскутов, С.Е. Акатов. Защита информационных потоков коммерческого назначения на промышленном предприятии.....	122
А.Д. Попова, И.Г. Дровникова. Практические рекомендации по проведению оценки защищенности программного обеспечения и выбору его оптимальной версии для эксплуатации на объектах информатизации органов внутренних дел	130
П.В. Разумов, Л.В. Черкесова, Е.А. Ревякина, А.А. Клевцов. Механизм защиты от DDoS-атаки, направленной на блокирование учётных записей.....	139
А.М. Садыков, Р.Р. Ямалетдинов. Методика нагрузочного тестирования средств межсетевого экранирования	150
М.В. Шевцов, А.Н. Денисов, М.В. Иванов, А.А. Козлов. Интеллектуальный анализ процессов дымообразования на пожарах: новые подходы на основе ИИ-технологий	159
А. И. Янгиров, Е. А. Рогозин, П. М. Дуплякин, Т. В. Мещерякова, А. О. Ефимов. Математическая модель количественной оценки защищенности открытых операционных систем при их выборе в АС ОВД.....	169
Строительство и архитектура.....	180
М.А. Высоцкая, Я.М. Катрич, К.В. Мешкова. Оптимизация асфальтобетонных покрытий: достижения в области активации и гидрофобизации минеральных порошков.....	180
М.А. Магомедов, В.В. Кузнецов, Б.М. Языев, С.В. Литвинов. Численно-аналитический метод в решении задачи ползучести полой оболочки	190
О.Ю. Маликова, Д.Ф. Карпов, Т.В. Сазонова. Исследование параметров внутреннего воздуха жилого здания при усовершенствовании системы вытяжной вентиляции.....	201
Л.Н. Панасюк, А.А. Фириченко, А.Д. Мерзлякова, В.С. Тюрина. Решение динамической задачи о воздействии подвижной массивной нагрузки на конструкцию прямыми методами	211
И.Тальха. Анализ энергетического баланса и моделирование системы отопления для жилого дома	220
Г.Н. Хаджишалапов, П.Д. Батаева, Х.М. Батаева, А.Д. Батаев. Экспериментальный подбор ремонтно-реставрационного состава раствора на основе гидравлической строительной извести	227
А.К. Юсупов, Х.М. Муселемов, Р.И. Вишталов. Нелинейные модели балок с переменной жёсткостью	235
Требования к оформлению статей	247

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 . 2 , 2 0 2 5 .

Editor-in-Chief: Rasul M. Aliev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; https://orcid.org/0000-0002-3061-4121 Deputy Editor: Aida M. Esetova, Dr. Sci. (Econom.), Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; https://orcid.org/0000-0003-1093-5507 Editorial Board: Scientific rubric «Energy and Electrical Engineering» Executive editor: Oleg V. Evdulov, Dr. Sci. (Eng.), Aassoc. Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; Ganapi J. Akhmedov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; Alexander P. Ivanov, Dr. Sci. (Mathematics and Physics), Moscow Institute of Physics and Technology (State University), Dolgoprudny, Russia; Nicholay I. Kargin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Vice Rector, Deputy Director of the Institute for Functional Nuclear Electronics, National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia; Dmitry N. Kobzareno, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences Institute of Geothermal Problems, Daghestan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Makhachkala, Russia; Alexander A. Krugljakow, Dr. Sci. (Eng.), Professor, General Director Wissenschaftliche Beratung und Handelsvertretung, Vladimir M. Kutuzov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, President St. Petersburg Electrotechnical University «LETI», Saint-Petersburg, Russia; Magomed Kh. Magomedov, Dr. Sci. (Mathematics and Physics), General Director, "SAUNO" Ltd. Moscow, Russia; Gadzhimet K. Safaraliyev, Dr. Sci. (Mathematics and Physics), Professor, Scientific Director of the «Microelectronics and Nanotechnology» Research Institute, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; Alexander B. Sulin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Corresponding member, MAX, Institute of Industrial and Marine Medicine of Federal Medical and Biological Agency, St. Petersburg, Russia; Scientific rubric «Information Technology and Telecommunications» Executive editor: Gromov Yu.Yu., Dr. Sci. (Eng.), Professor, Director of the Institute of Automation and Information Technologies, Tambov State Technical University, Tambov, Russia; Mahir M. Bashirov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Azerbaijan Technical University, Baku, Azerbaijan; Arkady N. Larionov, Dr. Sci. (Economics), Professor, General Director LLC Research Center «Strategy», Moscow, Russia Igor E. Lobanov, Dr. Sci. (Eng.), Leading Researcher, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia; Mher V. Markosyan, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Director of Yerevan Research Institute of Communication Facilities, Yerevan, Republic of Armenia; Aslan G. Mustafayev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; Eugene A. Rogozin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Voronezh Institute of the Ministry of the Interior of Russia, Voronezh, Russia; Tazhudin E. Sarkarov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; Boris I. Shakhtarin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia Valery I. Finayev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department, Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia; Vyacheslav M. Khachumov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of laboratory, Institute for Systems Analysis of RAS, Moscow, Russia; Alexey G. Yakunin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department, Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia. Scientific rubric «Building and architecture» Executive editor: Gadzhimurad N. Khadzishalapov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; Vladimir I. Andreev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russia; Alexey N. Davidyuk, Dr. Sci. (Eng.), Honored Builder of Russia, Director, Gvozdev NII ZHB, JSC «SIC Construction», Moscow, Russia; Vladimir G. Kazachek, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Senior researcher, Ataev Institute of Dwelling - NIPTIS Director of Mobile diagnostics in construction, Minsk, Republic of Belarus; Khasan N. Mazhiev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Millionshchikov Grozny State Oil Technical University, Grozny, Russia; Gregory V. Nesvetaev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of Construction Technologies Department, Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia; Batyr M. Yazyev, Dr. Sci. (Eng.), Advisor to RAASN, Professor of Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia.	Research areas 2.4.8. Machines and devices, processes of refrigeration and cryogenic equipment (Technical Sciences), 2.3.1. System analysis, management and information processing (Technical Sciences), 2.3.3. Automation and management of technological processes and production (Technical Sciences), 2.3.4. Management in organizational systems (Technical Sciences), 1.2.2. Mathematical modeling, numerical methods and program complexes (Technical Sciences), 2.3.6. Methods and systems for information security, information security (Technical Sciences), 2.3.7. Computer modeling and design automation (Technical sciences) 2.1.3. Heat supply, ventilation, air conditioning, gas supply and lighting (Technical Sciences), 2.1.5. Building materials and products (Technical Sciences), 2.1.9. Construction mechanics (Technical Sciences), Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. Vol. 52, No.2 Makhachkala, 2025–248p. Published by Decision of the Academic Council Daghestan State Technical University Edition and Publisher Address: 70 I. Shamil Ave., Makhachkala, the Republic of Daghestan 367015, Russia. Daghestan State Technical University Tel./fax (8722)623715 (8722)623964
Editorial council Chairman of the editorial council: Boris A. Yakimovich, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia. The co-chairs of the editorial council: Konstantin M. Ivanov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Rector, Ustinov Baltic State Technical University «VOENMECH», Saint-Petersburg, Russia; Vladimir M. Kutuzov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, President St. Petersburg Electrotechnical University «LETI», Saint-Petersburg, Russia; Members of the Editorial Board: Mustafa B.-O. Babanly, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Rector, Azerbaijan State University of Oil and Industry, Baku, Azerbaijan; Islam I. Djanzakov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Corresponding member, SRA RK, Academician of MANEB, Atyrau, Republic of Kazakhstan; Sergey I. Timoshin, Dr. Sci. (Mathematics and Physics), Academician of the Belarusian Academy of Engineering, Professor, Rector, Sukhoi Gomel State Technical University, Gomel, Republic of Belarus;	

CONTENTS

Energy and Electrical Engineering.....	6
S.Z. Bayramov, O.S. Malinina, A.V. Baranenko. Investigation of an Absorption Refrigeration System in the Climatic Conditions of Astrakhan Using Solar Collectors.....	6
O.V. Evdulov, S.G. Gasanova, G.A. Mutalipova. Cooling thermoelectric device for the treatment of injuries of the spine and spinal cord.....	18
A.Yu. Ikonnikova, A.Yu. Baranov, Yu.A. Kravchenko, D.V. Kravchenko. Modification of the Mixed Fluid Cascade cycle with heat recovery of the working fluid reverse flows and optimised natural gas flow pressure.....	27
A.V. Kolinko, M.V. Shamarov, A.O. Galanin, I.I. Yurchenko, R.A. Zhlobo, A.S. Zaitsev. Features of application and calculation of operating modes of heat pipes in low-temperature installations and life support systems.....	42
M.F. Rudenko, Y.V. Shipulina, V.N. Sainova, E.V. Andreeva. Design features of the generator-absorber reactor of solar power refrigeration plants.....	52
Information Technology and Telecommunications.....	63
N.L. Balamirzoev, <u>V.B. Melekhin</u> A method of processing expert data for constructing empirical mathematical models of complex systems operating in unstable environments.....	63
O.Yu. Basharina, E.V. Butsenko, A.S. Ereemeev. Information security incident management and analysis service	74
A.I. Dubrovina. A hybrid method for modeling artificial intelligence systems to detect cyberattacks	81
V.A. Egunov. A new method for determining the characteristics of block algorithms.....	90
A.O. Efimov. Causes, classification, and criticality of information system software vulnerabilities.....	98
G.I. Kachaeva, N. G. Sultanov. Security threat protection strategies: development of a cybersecurity system.....	107
D.A. Kryukova, S.D. Shibaikin, V.V. Nikulin, S.R. Baibikova, N.O. Surkov, V.Yu. Kozyaykin. Combination of systems for recognition and tracking of anomalous objects in telecommunication systems	116
I.A. Loskutov, S.E. Akatov. Protection of commercial information flows in an industrial enterprise	122
A.D. Popova, I.G. Drovnikova. Practical recommendations for assessing software security and choosing its optimal version for use at facilities of informatization of internal affairs agencies.....	130
P.V. Razumov, L.V. Cherksova, E.A. Revyakina, A.A. Klevtsov. Protection mechanism against Ddos attack intended to block account.....	139
A.M. Sadykov, R.R. Yamaletdinov. Methodology of load testing of firewalling tools	150
M.V. Shevtsov, A.N. Denisov, M.V. Ivanov, A.A. Kozlov. A Intelligent analysis of smoke formation processes in fires: new approaches based on AI technologies.....	159
A.I. Yangirov, E.A. Rogozin, P.M. Duplyakin, T.V. Meshcheryakova, A.O. Efimov. Mathematical model for quantitative assessment of the Security of open operating systems when selecting in the AS of the Internal Affairs Bodies	169
Building and Architecture	180
M.A. Vysotskaya, Ya.M. Katrich, K.V. Meshkova. Optimization of Asphalt Concrete Coatings: Advances in Activation and Hydrophobization of Mineral Powders	180
M.A. Magomedov, V.V. Kuznetsov, B.M. Yazyev, S.V. Litvinov. Numerical-analytical method in solving the problem of creep of a shallow shell	190
O.Y. Malikova, D.F. Karpov, T.V. Sazonova. Investigation of internal air parameters in a residential building when improving the exhaust ventilation system	201
L.N. Panasyuk, A.A. Firichenko, A.D. Merzlyakova, V.S. Tyurina. Solution of the dynamic problem of the effect of a mobile massive load on a structure by direct methods	211
I.Talha. Energy balance analysis and heating system modeling for a residential building.....	220
G.N. Khadzhishalapov, P.D. Bataeva, H.M. Bataeva, A.D. Bataev. Experimental selection of repair and restoration composition of mortar based on hydraulic building lime	227
A.K. Yusupov, Kh.M. Muselemov, R.I. Vishtalov. Nonlinear models of beams with variable stiffness.....	235
Formatting requirements for papers	247

ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА
ENERGY AND ELECTRICAL ENGINEERING

УДК 621.574.013-932.2

DOI: 10.21822/2073-6185-2025-52-2-6-17



Оригинальная статья /Original article

Исследование системы холодоснабжения на базе абсорбционной бромистолитиевой холодильной машины в климатических условиях г. Астрахани с применением солнечной энергии

Ш.З. Байрамов, О.С. Малинина, А.В. Бараненко

Национальный исследовательский университет ИТМО,
197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, Россия

Резюме. Цель. В данной работе рассматриваются показатели системы охлаждения на основе абсорбционной бромистолитиевой холодильной машины (АБХМ) на солнечной энергии в климатических условиях г. Астрахани. **Метод.** Для анализа работы системы была разработана и верифицирована новая математическая модель, основанная на данных имитационного моделирования. Адекватность модели была проверена путем сравнения с существующими данными, а также проведены расчеты необходимого количества солнечных коллекторов. **Результат.** Исследование показало, что эффективность работы АБХМ зависит от режима подачи охлаждающей среды в абсорбер и конденсатор АБХМ. Параллельная подача демонстрирует лучшие результаты по величине теплового коэффициента. Динамика тепловой нагрузки на генератор показала, что солнечная инсоляция напрямую влияет на производительность системы, достигая максимальной эффективности при высоких уровнях солнечной энергии. **Вывод.** Результаты работы могут быть использованы для разработки и оптимизации систем холодоснабжения в условиях жаркого климата, что способствует более эффективному использованию солнечной энергии и повышению энергоэффективности.

Ключевые слова: энергоэффективность, моделирование системы холодоснабжения, абсорбционная бромистолитиевая холодильная машина, солнечная энергия, аккумуляция тепловой энергии, действительный термодинамический цикл.

Для цитирования: Ш.З. Байрамов, О.С. Малинина, А.В. Бараненко. Исследование системы холодоснабжения на базе абсорбционной бромистолитиевой холодильной машины в климатических условиях г. Астрахани с применением солнечной энергии. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025;52(2):6-17. DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-2-6-17

Investigation of an Absorption Refrigeration System in the Climatic Conditions of Astrakhan Using Solar Collectors

S.Z. Bayramov, O.S. Malinina, A.V. Baranenko

National Research University ITMO,
49 Kronverksky Ave., St. Petersburg 197101, Russia

Abstract. Objective. This study examines the performance indicators of a solar-powered lithium bromide absorption chiller (LBAC) in the climate conditions of Astrakhan. **Method.** A new mathematical model based on simulation data was developed and verified to analyze the system's performance. The model's accuracy was validated by comparing it with existing data, and calculations were performed to determine the required number of solar collectors. **Result.** The study showed that the efficiency of the LBAC depends on the mode of coolant supply to the absorber and condenser of the LBAC. Parallel supply demonstrated better results in terms of thermal coefficient. The dynamics of the thermal load on the generator showed that solar insolation directly affects system performance, achieving maximum efficiency at high levels of solar energy. **Conclusion.** The results of this study can be used to design and optimize cooling systems in hot climates, promoting more efficient use of solar energy and enhancing energy efficiency.

Keywords: energy efficiency, refrigeration system modeling, lithium bromide absorption refrigeration machine, solar energy, thermal energy storage, actual thermodynamic cycle.

For citation: S.Z. Bayramov, O.S. Malinina, A.V. Baranenko. Investigation of an Absorption Refrigeration System in the Climatic Conditions of Astrakhan Using Solar Collectors. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2025;52(2):6-17. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-2-6-17

Введение. Повышение энергоэффективности систем холодоснабжения весьма актуально и является одним из основных трендов развития техники низких температур. Широкое применение абсорбционных бромистолитиевых холодильных машин (АБХМ) с использованием возобновляемых источников энергии (ВИЭ) обеспечивает экономию энергоресурсов. Исследованию систем холодоснабжения на базе АБХМ посвящено большое количество работ [1 – 11].

В работе [1] проведено экспериментальное исследование эффективности системы холодоснабжения на базе одноступенчатой АБХМ с использованием солнечных коллекторов для охлаждения конференц-зала. Авторы статьи [2] представили систему с использованием АБХМ на солнечной энергии для кондиционирования воздуха и получения пресной воды, где охлаждающей средой являлась морская вода.

В исследовании [3] авторами рассматривалась система холодоснабжения с гелиопреобразователями на базе АБХМ, работающая от солнечной энергии и природного газа, для торговых центров в Барранкилье, Колумбия. Результаты показали, что данная система может уменьшить выбросы парниковых газов. В работе [4] выполнена экспериментальная оценка эффективности АБХМ, разработанной для высокоэффективной системы охлаждения с использованием солнечных гелиопреобразователей энергии. Авторами статьи [5] предложена новая комбинированная система электро- и холодоснабжения с использованием одноступенчатой АБХМ и солнечных коллекторов для региона Доха, Катар. В статье [6] выполнен анализ эффективности АБХМ с двухступенчатой генерацией раствора для системы холодоснабжения центра обработки данных. В исследовании [7] предложена интеграция установки обратного осмоса и комбинированной системы холодоснабжения на базе одноступенчатой АБХМ и опреснения воды.

Результаты показали, что использование интеграционной системы снижает потребление электроэнергии системы холодоснабжения. В работе [8] на основе эксперимента выполнена оценка эффективности одноступенчатой АБХМ в системе кондиционирования жилых помещений. В статье [9] рассмотрена комбинированная компрессорно-абсорбционная система кондиционирования воздуха для климатических условий Алжира. Авторами исследования [10] предлагается система холодоснабжения, состоящая из одноступенчатой АБХМ с солнечными коллекторами и установки ночного радиационного охлаждения (НРО). Данная система включает в себя специализированный модуль, который служит для сбора солнечной тепловой энергии для работы АБХМ в дневное время и для реализации НРО в ночное время. Авторы работы [11] исследовали систему холодоснабжения на базе АБХМ с двухступенчатой генерацией раствора, работающую совместно с гелиопреобразователями солнечной энергии в условиях субтропического климата Гуанчжоу, Китай. В статье [12] приведены результаты исследования коллектора комбинированного типа с селективным покрытием, обеспечивающим поглощение теплоты солнечной радиации днем и излучение теплоты в космическое пространство ночью, применительно к использованию в системах охлаждения на базе АБХМ.

В рассмотренных исследованиях авторы использовали методы математического и имитационного моделирования, которые позволяют анализировать компоненты системы и прогнозировать их работу. Имитационные модели широко применяются для изучения различных инженерных систем, в том числе систем холодоснабжения на базе АБХМ [13 – 19].

В литературных источниках [13, 14] разработаны математические модели системы холодоснабжения на базе АБХМ для климатических условий Индонезии. Целью статьи [15] являлся поиск наиболее эффективного чиллера, работающего в связке с гелиопреобразователями тепловой энергии. Моделирование проводилось с использованием сред MATLAB и TRNSYS. В работе [16] использована среда MATLAB/Simulink для разработки математической модели системы холодоснабжения с использованием одноступенчатой АБХМ и солнечных вакуумных коллекторов в условиях климата Маана, Иордания. Авторы статьи [17] провели моделирование системы холодоснабжения на базе АБХМ, работающей на солнечной энергии в программной среде TRNSYS для кондиционирования воздуха в школе, расположенной в Пуэртеситос, Мексика. Целью работы [18] была разработка и проверка математической модели АБХМ для системы кондиционирования воздуха в климатических условиях Испании с использованием среды TRNSYS. В статье [19] проведено моделирование системы холодоснабжения с помощью программного обеспечения MATLAB для пяти климатических зон Алжира.

Проведенный анализ позволяет сделать вывод о том, что системы холодоснабжения на базе АБХМ с использованием солнечной энергии представляют собой активно развивающийся сегмент холодильной техники, что подтверждается большим объемом публикаций в этой области. В рамках данных исследований особое внимание уделяется разработке и совершенствованию математических и имитационных моделей, которые направлены на анализ и оптимизацию работы АБХМ. Однако, несмотря на разнообразие моделей, все они обладают определенными ограничениями, касающимися точности расчетов и применимости в различных условиях. Результаты исследований, полученные с использованием существующих моделей, в большинстве случаев не могут быть адаптированы к другим климатическим условиям.

Постановка задачи. Цель работы состоит в исследовании показателей системы холодоснабжения на базе одноступенчатой АБХМ на солнечной энергии в условиях климата г. Астрахани, а также в расчете необходимого количества солнечных коллекторов на основе данных имитационного моделирования.

Методы исследования. Используемая в данном исследовании имитационная модель базируется на математической модели, позволяющей определять термодинамические параметры водного раствора бромида лития в широком диапазоне температур и концентраций, обеспечивая гибкость анализа и достигая точности с отклонением, в среднем, порядка 3%.

Исследуемая система холодоснабжения состоит из солнечных коллекторов, АБХМ, аккумулятора тепловой энергии, градирни и потребителя холода. Проанализированы различные схемы подачи охлаждающей среды через абсорбер и конденсатор АБХМ: параллельная, последовательная и противоточная. Энергоэффективность системы повышается за счет использования солнечных коллекторов и аккумуляторов теплоты. Солнечные коллекторы выступают в роли греющего источника.

Аккумулятор тепла позволяет поддерживать требуемую температуру охлаждения в ночное время и компенсировать пиковые нагрузки в течение дня. АБХМ работает по действительному, с учетом необратимых потерь, одноступенчатому термодинамическому циклу. Принцип действия и описание термодинамических процессов представлены в литературе [20, 21].

Имитационная модель системы холодоснабжения на базе АБХМ. Функциональная схема подключения системы холодоснабжения на базе АБХМ с использованием солнечных коллекторов и аккумулятированием тепловой энергии представлена на рис. 1 [22]. Основой данной системы является АБХМ, которая состоит из пяти основных теплообменных аппаратов: генератор, конденсатор, абсорбер, испаритель и растворный теплообменник, а также включает в себя различное вспомогательное оборудование. Процессы, происходящие в теплообменных аппаратах АБХМ, обеспечивают выработку холода для системы

кондиционирования. Для осуществления рабочего цикла АБХМ необходим подвод теплоты от греющего источника в генератор. Тепло, выделяющееся в конденсаторе и абсорбере, отводится с помощью оборотной воды, охлаждаемой в градирне.

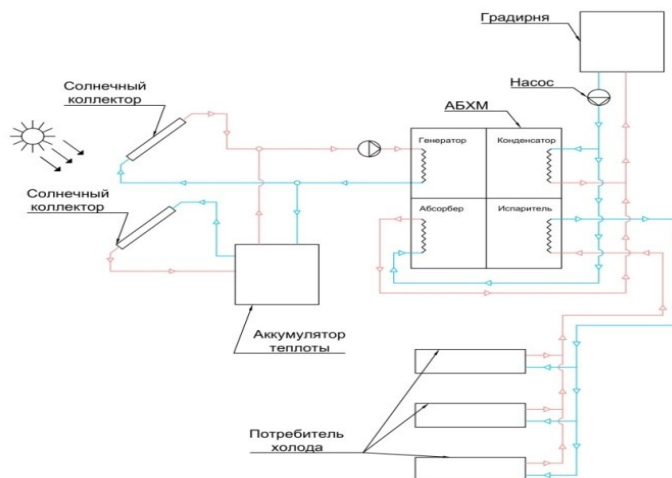


Рис. 1 - Функциональная схема подключений системы холодоснабжения на базе АБХМ с параллельной подачей охлаждающей воды в конденсатор и абсорбер

Fig. 1 - Functional diagram of the cooling system connections based on an absorption lithium bromide chiller with parallel supply of cooling water to the condenser and absorber

При выполнении теплового расчета действительного термодинамического цикла АБХМ используются уравнения для определения термодинамических параметров водного раствора бромида лития и энергетических показателей [20, 21, 23]:

$$\text{Кратность циркуляции раствора} \quad a = \frac{\xi_r}{\Delta \xi}$$

где $\Delta \xi$ – зона дегазации, %.

Удельные тепловые потоки аппаратов, кДж/кг

$$\text{Испаритель} \quad q_0 = h_1' - h_3$$

$$\text{Конденсатор} \quad q_k = h_{3'} - h_3$$

$$\text{Абсорбер} \quad q_a = h_1' + (a-1) \cdot h_8 - a \cdot h_2$$

$$\text{Генератор} \quad q_h = h_{3'} + (a-1) \cdot h_4 - a \cdot h_7$$

$$\text{Теплообменник растворов} \quad q_T = (a-1) \cdot (h_4 - h_8)$$

$$\text{Тепловой коэффициент} \quad \zeta = \frac{q_0}{q_h}$$

Для определения энергетических показателей холодильной машины, необходимо определить массу рабочего вещества (D , кг/с), циркулирующего через аппараты $D = \frac{Q_0}{q_0}$.

Расход рабочего вещества будет одинаков для любого аппарата холодильной машины.

Полная тепловая нагрузка на теплообменный аппарат, кВт

$$Q_i = D \cdot q_i$$

где i – наименование аппарата.

Уравнения для расчета параметров коллектора изложены в литературе [24]:

Площадь поверхности плоского коллектора, м²

$$S = a \cdot b$$

где a – длина коллектора, м; b – ширина коллектора, м

Площадь поверхности вакуумного коллектора, m^2

$$S = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h = \pi \cdot d \cdot h$$

где r – радиус трубки, м; d – диаметр трубки, м; h – длина трубки, м.

Тепловой поток одной трубки/панели солнечного коллектора, кВт

$$Q_{sun} = S \cdot E \cdot \eta$$

где S – площадь трубки/панели, m^2 ; E – плотность потока солнечной радиации, кВт/ m^2 ; η – КПД коллектора.

Общее количество трубок/панелей коллектора, шт.

$$N_{sun} = \frac{Q_h}{Q_{sun}}$$

Блок-схема имитационной модели. На основе функциональной схемы подключения, представленной на рис. 1, была разработана математическая модель, которая послужила основой для создания имитационной модели. Имитационная модель разработана в соответствии с блок-схемой, показанной на рис. 2.

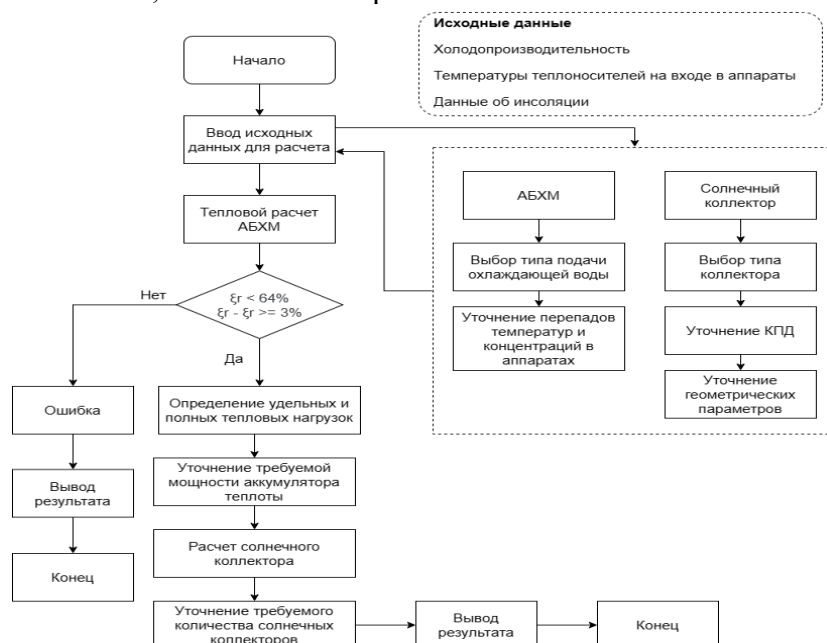


Рис. 2 - Блок-схема имитационной модели

Fig. 2 - Block diagram of the simulation model

При разработке модели приняты следующие допущения: отсутствует фактор загрязненности солнечных коллекторов; максимально допустимая концентрация водного раствора бромида лития в АБХМ составляет не более 64%; зона дегазации раствора менее 3% недопустима ввиду увеличения необратимых потерь машины.

Термодинамические параметры водного раствора бромида лития определяются согласно математической модели, описывающей состояние раствора в широких диапазонах значений [23]. Адекватность предложенной математической модели была проверена путем расчетов систем охлаждения из работ [14, 16, 18] и сравнения полученных результатов с данными, представленными в названных работах. Сопоставление показало расхождения не более 7%. Расчеты системы охлаждения для условий г. Астрахани с использованием известных моделей показали некорректные результаты, что по всей видимости связано с тем, что данные модели не адаптированы к климатическим условиям г. Астрахани.

С использованием модели проведены расчет и анализ системы холодоснабжения 3-этажного остекленного офисного здания, расположенного в городе Астрахань, при следующих исходных данных: холодопроизводительность $Q_o = 150$ кВт, температура охлаждаемой среды $t_{sl} = 12$ °С, температура охлаждающей воды принята равной $t_{wl} = 30$ °С, температура греющего источника варьировалась в пределах $t_{hl} = (96 \div 106)$ °С, необратимые потери действительного цикла были приняты согласно рекомендациям, изложенным в [20, 21]. Климатические данные, необходимые для проведения расчета (согласно СП131.13330.2020): температура окружающей среды $t_{o.c} = 33$ °С, среднее. Показатель плотности потока солнечной радиации определяется за период с апреля по сентябрь, так как в указанное время года в выбранном регионе требуется функционирование системы холодоснабжения.

Данные о распределении солнечной радиации по часам за указанный период в городе Астрахань представлены на рис. 3 [25].

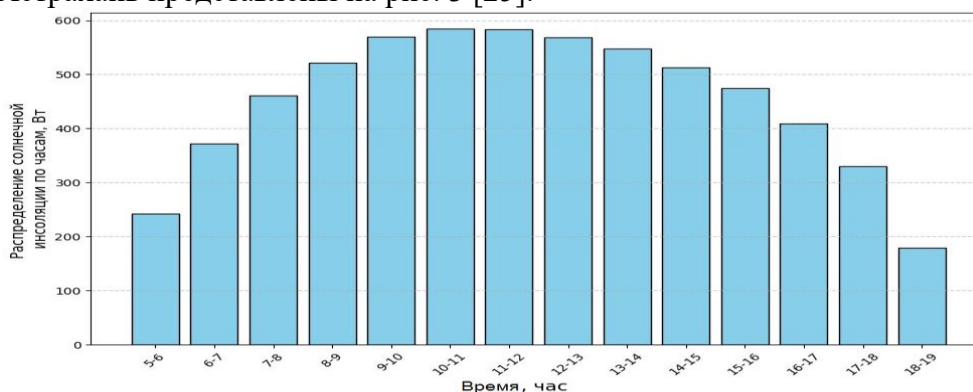


Рис. 3 - Распределение солнечной радиации по часам за выбранный период, Вт/м²
Fig. 3 - Hourly distribution of solar radiation for the selected period, W/m²

Солнечные коллекторы бывают различных типов и конструкций, каждая из которых подходит для определенных условий эксплуатации. Выбор оптимальной конструкции солнечного коллектора определяется рядом факторов, включая эффективность, стоимость и условия окружающей среды. Для изучаемой системы охлаждения, в которой температура теплоносителя не превышает 110 °С, целесообразно использовать плоские коллекторы, отличающиеся простотой и относительно невысокой стоимостью [26].

Среди наиболее распространенных выделяют:

- солнечные панели – простейшие по конструкции, подходящие для летнего периода. Ключевой элемент в них абсорбер, от качества которого зависит общая эффективность.
- вакуумные коллекторы – их конструкция сложнее первых, в то же время обеспечивающая более высокую эффективность. Вакуум позволяет снизить теплопотери, что делает их пригодными для использования не только в летний, но и переходные периоды. Кроме того, их устройство обеспечивает легкую замену трубок при поломке, что повышает общую надежность системы.

Ввиду более высокой эффективности, простоты ремонта, возможности работы в переходные периоды в исследуемой системе холодоснабжения были выбраны вакуумные солнечные коллекторы. При анализе действительного термодинамического цикла АБХМ рассматривалась параллельная подача охлаждающей среды в абсорбер и конденсатор, последовательная подача из абсорбера в конденсатор и противоточная подача из конденсатора в абсорбер.

Обсуждение результатов. На рис. 4 (а, б) представлены результаты расчета теплового коэффициента и теплового потока аккумулятора тепловой энергии при различной подаче охлаждающей среды через аппараты, где t_{hl} – температура греющего источника на входе в генератор, ζ – тепловой коэффициент, Q – тепловая нагрузка генератора.

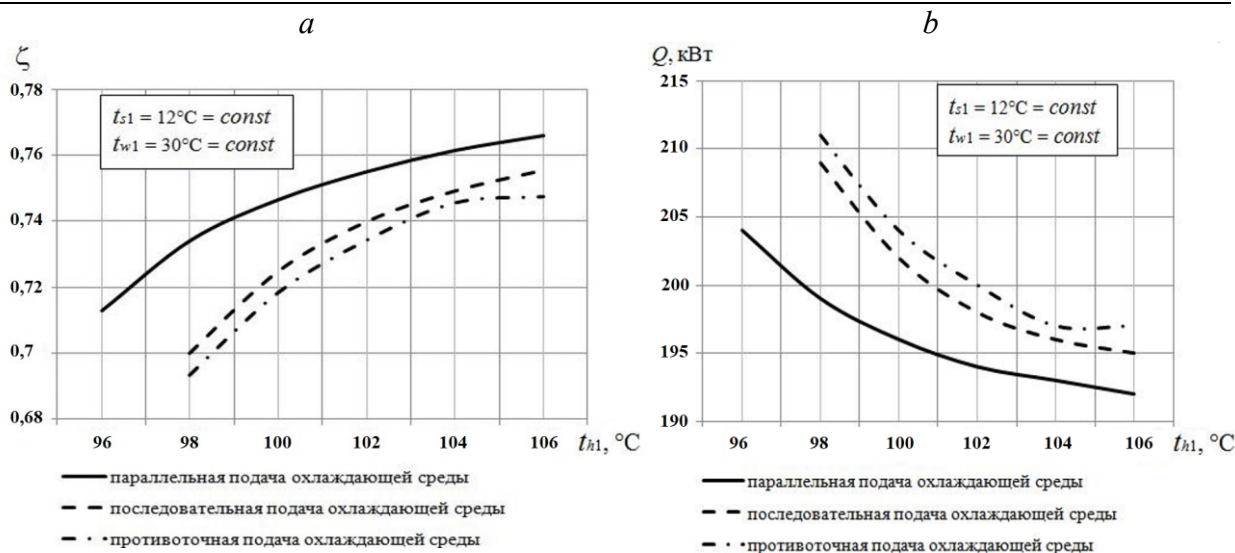


Рис. 4 - Результаты расчета теплового коэффициента (а) и теплового потока аккумулятора тепловой энергии (б)

Fig. 4 - Calculation results of the thermal coefficient (a) and the heat flow of the thermal energy storage (b)

Из графика на рис. 4 (а) видно, что с увеличением температуры греющего источника в указанном диапазоне происходит постепенное повышение теплового коэффициента ζ для всех рассмотренных режимов подачи охлаждающей среды. При параллельной подаче охлаждающей среды тепловой коэффициент увеличивается с 0,72 до 0,76; при последовательной подаче с 0,69 до 0,74; при противоточной подаче с 0,68 до 0,74.

Результаты показывают, что наиболее эффективной является параллельная подача охлаждающей среды, что объясняется более равномерным распределением тепловых потоков между абсорбером и конденсатором, что приводит к лучшему отводу теплоты. В свою очередь значение теплового потока аккумулятора тепловой энергии для обогрева генератора снижается при параллельной подаче охлаждающей среды с 207 до 197 кВт; при последовательной подаче охлаждающей среды с 211 до 198 кВт; при противоточной подаче охлаждающей среды с 213 до 200 кВт (рис. 4, б). Оптимальный режим наблюдается при $\Delta\zeta = 5\%$ для параллельной подачи охлаждающей воды. При этом значения рабочих параметров равны $\zeta = 0,74$, $t_{h1} = 98^\circ\text{C}$, $Q_h = 203$ кВт.

В соответствии с приведенным ранее методом расчета требуемого количества солнечных коллекторов, определим их количество, зная информацию о типе и характеристиках коллектора, требуемой тепловой нагрузке на генератор АБХМ, величине солнечной инсоляции по часам за рассматриваемый период. Так, для пикового значения $Q_h = 203$ кВт, апертурной площади вакуумного коллектора $S = 2,84 \text{ м}^2$ и значения солнечной инсоляции $E = 0,4 \text{ кВт/м}^2$, требуемое количество коллекторов составит 185 шт. В то же время, для обеспечения требуемого количества теплоты достаточно 70% от рассчитанного количества солнечных коллекторов, что равно 120 шт., ввиду меняющейся в течение дня потребности в холоде, и следовательно, нагрузке на генератор АБХМ, а также наличия аккумулятора тепловой энергии.

Рис. 5 иллюстрирует работу системы холодоснабжения в динамике по часам, отражая время заряда и использования аккумулятора теплоты для компенсации требуемого количества теплоты в пиковые часы. В системе охлаждения рассматривается аккумулятор теплоты с использованием жидкого теплоносителя – водного раствора пропиленгликоля массовой концентрацией 37%.

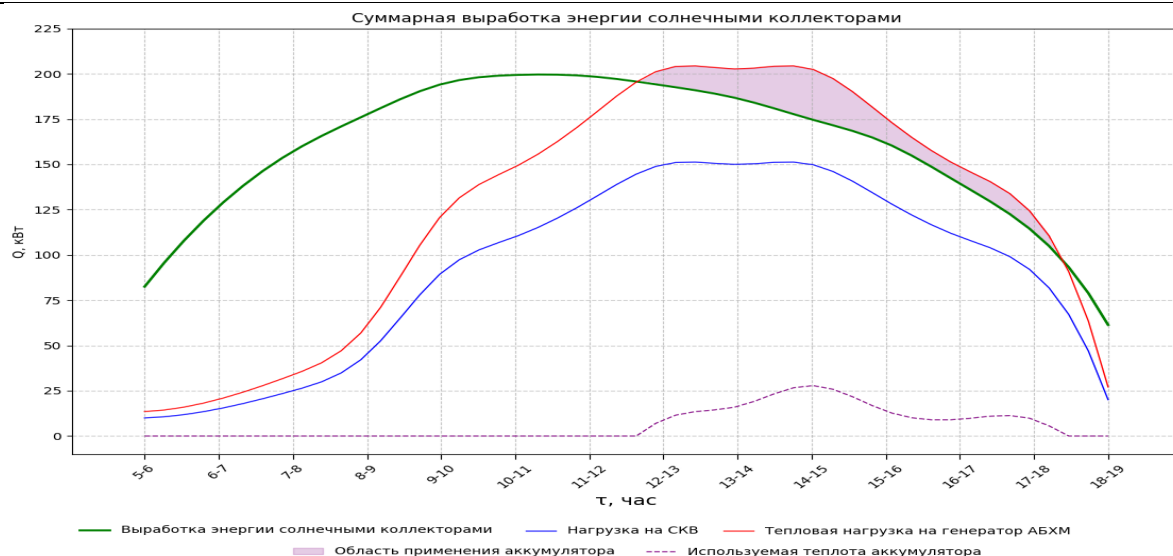


Рис. 5 - Динамика работы системы холодоснабжения, при изменении значения солнечной инсоляции в течение дня

Fig. 5 - Dynamics of the cooling system operation with changing solar irradiation throughout the day

На рис. 5 представлена динамика работы системы холодоснабжения в зависимости от изменения уровня солнечной инсоляции в течение дня. Данные иллюстрируют, как различные уровни инсоляции влияют на фактическое количество тепловой энергии, получаемой от солнечного коллектора, а также на разницу между требуемым и фактическим значениями теплоты.

В утренний период (6:00 – 9:00) солнечные коллекторы начинают вырабатывать тепловую энергию, которая направляется на заряд аккумулятора теплоты. Низкая потребность в охлаждении со стороны СКВ в это время позволяет накопить избыточное тепло для дальнейшего использования в течение дня. В основной рабочий период (9:00 – 18:00) солнечные коллекторы функционируют следующим образом. С 9:00 до 12:00 выработка тепловой энергии солнечными коллекторами достигает максимума. В этот период времени необходимость в охлаждении начинает расти, и выработанное тепло направляется на обеспечение генератора АБХМ. С 12:00 до 17:30 потребность в охлаждении достигает пиковых значений, что связано с повышением температуры окружающей среды и увеличением нагрузки на систему холодоснабжения. В случае недостаточной выработки тепла аккумуляторы теплоты компенсируют дефицит и поддерживают работу генератора. После 17:30 необходимость в охлаждении постепенно снижается, что уменьшает нагрузку на систему.

Важно отметить, что выработка тепловой энергии с солнечными коллекторами неравномерна и подвержена колебаниям из-за изменения уровня инсоляции в течение дня. Это приводит к временному дисбалансу между необходимым количеством теплоты для генератора и фактически доступной теплотой. Для обеспечения стабильной работы системы применяются аккумуляторы теплоты. Они компенсируют нехватку энергии в периоды сниженной солнечной активности, поддерживая эффективную работу системы даже при изменяющихся климатических условиях.

Ввиду этого, можно заключить, что, система холодоснабжения на базе АБХМ с использованием солнечных коллекторов и аккумуляторов тепловой энергии позволяет надежно покрыть потребность в охлаждении. Применение аккумуляторов обеспечивает бесперебойную работу системы, нивелируя влияние колебаний солнечной инсоляции, и способствует эффективному использованию возобновляемых источников энергии.

В табл. 1 представлены характеристики работы, рассмотренной системы холодоснабжения.

Таблица 1. Характеристики системы холодоснабжения
Table 1. Characteristics of the refrigeration system

Параметр Parameter	Значение Value
Одноступенчатая АБХМ Single-stage ABSM	
Тип подачи охлаждающей воды Cooling water supply type	Параллельная Parallel
Холодопроизводительность, кВт Cooling capacity, kW	150
Тепловая нагрузка генератора, кВт Generator thermal load, kW	203
Температура греющего источника на входе в генератор, °C Temperature of heating source at generator inlet, °C	98
Температура охлаждающей воды, °C Cooling water temperature, °C	30
Температура охлаждаемой среды, °C Temperature of cooled medium, °C	12
Аккумулятор теплоты Heat accumulator	
Часы заряда, ч Charging hours, h	6
Часы разряда, ч Discharging hours, h	5:30
Ёмкость, кВтч Capacity, kWh	60
Объем, м ³ Volume, m ³	5,2
Тип Type	ёмкостной capacitive
Температурный диапазон Temperature range	110 – 118
Теплоноситель Coolant	Водный раствор пропиленгликоля, 37 % масс/ Propylene glycol aqueous solution, 37% by weight
Вакуумные солнечные коллекторы Vacuum solar collectors	
Апертурная площадь, м ² Aperture area, m ²	2,84
Длина трубки, м Tube diameter, m	1,8
Диаметр трубки, м Tube length, m	0,035
Количество трубок в 1 панели, шт. Number of tubes in 1 panel, pcs.	30
Размеры, м Dimensions, m	2 x 2,2
КПД Efficiency	70 %
Температурный диапазон, °C Temperature range, °C	110 – 118
Требуемое количество панелей, шт. Required number of panels, pcs	120

Вывод. В современных условиях устойчивое развитие и использование возобновляемых источников энергии становятся все более актуальными, поэтому исследование систем холодоснабжения на основе абсорбционных холодильных машин на солнечной энергии приобретает особую значимость. Цель данной работы заключалась в изучении показателей таких систем в климатических условиях г. Астрахани и в расчете необходимого количества солнечных коллекторов для их эффективной работы.

Анализ показал, что эффективность работы АБХМ значительно зависит от режима подачи охлаждающей среды. Параллельная подача демонстрирует лучшие результаты по величине теплового коэффициента и может быть рекомендована для применения в условиях повышенных температур. Динамика тепловой нагрузки на генератор также показала, как солнечная инсоляция влияет на производительность системы, с увеличением которой возрастает эффективность установки.

Результаты исследования подтверждают целесообразность использования солнечной энергии для обеспечения работы абсорбционных холодильных систем в жарком климате. Использование таких систем не только повышает их энергоэффективность, но и способствует экологической устойчивости, что является важным аспектом энергосберегающих технологий.

Благодарности. Статья написана в рамках выполнения научно-исследовательской работы №622295 «Экологически безопасные технологии энергосбережения и повышения эффективности низкотемпературных систем и преобразователей энергии».

Aknowledgements. The article was written as part of the research work No. 622295 "Environmentally friendly technologies of energy saving and increasing the efficiency of low-temperature systems and energy converters".

Библиографический список:

1. Li M., Xu C., Hassanien R.H.E., Xu Y., Zhuang B. Experimental investigation on the performance of a solar powered lithium bromide-water absorption cooling system // *International Journal of Refrigeration*. 2016. V. 71. P. 46–59.
2. López-Zavala R., Velázquez-Limón N., González-Uribe L.A., Aguilar-Jiménez J.A., Alvarez-Mancilla J., Acuña A., Islas S. A novel LiBr/H₂O absorption cooling and desalination system with three pressure levels // *International Journal of Refrigeration*. 2019. V. 99. P. 469–478.
3. Rodriguez-Toscano A., Amaris C., Sagastume-Gutierrez A., Bourouis M. Technical, environmental, and economic evaluation of a solar/gasdriven absorption chiller for shopping malls in the Caribbean region of Colombia // *Case Studies in Thermal Engineering*. 2022. V. 30. P. 101743.
4. Xu Z.Y., Wang R.Z., Wang H.B. Experimental evaluation of a variable effect LiBr-water absorption chiller designed for high-efficient solar cooling system // *International Journal of Refrigeration*. 2015. V. 59. P. 135–143.
5. Nedaei N., Hamrang F., Garousi Farshi L. Design and 3E analysis of a hybrid power plant integrated with a single-effect absorption chiller driven by a heliostat field: A case study for Doha, Qatar // *Energy*. 2022. V. 239. P. 122415.
6. Han B., Li W., Li M., Liu L., Song J. Study on LiBr/H₂O absorption cooling system based on enhanced geothermal system for data center // *Energy Reports*. 2020. V. 6. P. 1090–1098.
7. Jalili B., Rezaeian A., Jalili P., Ganji D.D. The hybrid absorption cooling-desalination and reverse osmosis system to boost energy utilization efficiency // *Energy Reports*. 2023. V. 9. P. 5101–5110.
8. Chen J.F., Dai Y.J., Wang H.B., Wang R.Z. Experimental investigation on a novel air-cooled single effect LiBr-H₂O absorption chiller with adiabatic flash evaporator and adiabatic absorber for residential application // *Solar Energy*. 2018. V. 159. P. 579–587.
9. Salhi K., Korichi M., Ramadan K.M. Thermodynamic and thermo-economic analysis of compression-absorption cascade refrigeration system using low-GWP HFO refrigerant powered by geothermal energy // *International Journal of Refrigeration*. 2018. V. 94. P. 214–229.
10. Hu T., Kwan T.H., Pei G. An all-day cooling system that combines solar absorption chiller and radiative cooling // *Renewable Energy*. 2022. V. 186. P. 831–844.
11. Li Z., Ye X., Liu J. Performance analysis of solar air cooled double effect LiBr/H₂O absorption cooling system in subtropical city // *Energy Conversion and Management*. 2014. V. 85. P. 302–312.
12. Камара С., Сулин А. Б., Лысёв В. И. Аналитическое исследование производительности коллектора комбинированного типа для солнечного нагрева и ночного радиационного охлаждения // *Вестник Международной академии холода*. 2022. № 1. С. 26–36. DOI: 10.17586/1606 4313 2022 21 1-26-36
13. Lubis A., Jeong J., Saito K., Giannetti N., Yabase H., Alhamid M.I., Nasruddin N. Solar-assisted single-double-effect absorption chiller for use in Asian tropical climates // *Renewable Energy*. 2016. V. 99. P. 825–835.
14. Nasruddin N., Aisyah N., Alhamid M.I., Saha B.B., Sholahudin S., Lubis A. Solar absorption chiller performance prediction based on the selection of principal component analysis // *Case Studies in Thermal Engineering*. 2019. V. 13. P. 100391.
15. Xu Z.Y., Wang R.Z. Comparison of CPC driven solar absorption cooling systems with single, double and variable effect absorption chillers // *Solar energy*. 2017. V. 158. P. 511–519.
16. Marashli A., Alfanatseh E., Shalby M., Gomaa M.R. Modelling single-effect of Lithium Bromide-Water (LiBr-H₂O) driven by an evacuated solar tube collector in Ma'an city (Jordan) case study // *Case Studies in Thermal Engineering*. 2022. V. 37. P. 102239.
17. Aguilar-Jimenez J.A., Velazquez-Limon N., Lopez-Zavala R., Gonzalez-Uribe L.A., Islas S., Gonzalez E., Ramirez L., Beltran R. Optimum operational strategies for a solar absorption cooling system in an isolated school of Mexico // *International Journal of Refrigeration*. 2020. V. 112. P. 1–13.
18. Martínez P.J., Martínez J.C., Martínez P. Performance comparison of solar autonomous and assisted absorption systems in Spain // *International Journal of Refrigeration*. 2016. V. 71. P. 85–93.
19. Ketfi O., Merzouk M., Kasbadji N.M., Bourouis M. Feasibility study and performance evaluation of low capacity water-LiBr absorption cooling systems functioning in different Algerian climate zones // *International Journal of Refrigeration*. 2017. V. 82. P. 36–50.
20. Бараненко А.В., Бухарин Н.Н., Пекарев В.И., Тимофеевский Л.С. Холодильные машины. СПб.: Политехника, 2006. 944 с.

21. Бараненко А.В., Тимофеевский Л.С., Долотов А.Г., Попов А.В. Абсорбционные преобразователи теплоты. СПб.: СПбГУНиПТ, 2005. 338 с.
22. Малинина О.С., Бараненко А.В., Байрамов Ш.З. Оценка эффективности системы холодоснабжения на базе абсорбционной бромистолитиевой холодильной машины с аккумулярованием тепловой энергии // Материалы 13-й Международной научно-технической конференции «Техника и технология нефтехимического и нефтегазового производства». Омск: ОмГТУ, 2023. – С. 41–42.
23. Галимова Л.В., Байрамов Д.З., Байрамов Ш.З. Методика первичного проектирования научно обоснованной схемы оптимизации энергосберегающей системы на базе парогазовой энергетической установки и абсорбционной бромистолитиевой холодильной машины // Холодильная техника. 2020. № 1. С. 28–33.
24. Велижанин А.А., Мингалева Р.Д., Бессель В.В., Серовайский А.Ю. Изучение устройства и принципа действия солнечного коллектора: Учебно-методическое пособие. – М.: Издательский центр РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, 2023. 74 с.
25. Available: <https://globalsolaratlas.info/detail?c=46.321801,48.056602,11&s=46.346928,48.055573>. Global Solar Atlas, Accessed: Oct. 14, 2023. [Online].
26. Торопов А.Л. Комбинированные тепловые гелиосистемы. Ч. 1. Тепловые солнечные коллекторы для индивидуальных и децентрализованных систем отопления и горячего водоснабжения: учебное пособие. – М.: Издательский дом Академии Естествознания, 2019. – 88 с.

References:

1. Li M., Xu C., Hassanien R.H.E., Xu Y., Zhuang B. Experimental investigation on the performance of a solar powered lithium bromide-water absorption cooling system. *International Journal of Refrigeration*. 2016;71:46–59.
2. López-Zavala R., Velázquez-Limón N., González-Urbe L.A., Aguilar-Jiménez J.A., Alvarez-Mancilla J., Acuña A., Islas S. A novel LiBr/H₂O absorption cooling and desalination system with three pressure levels *International Journal of Refrigeration*. 2019;99:469–478.
3. Rodriguez-Toscano A., Amaris C., Sagastume-Gutierrez A., Bourouis M. Technical, environmental, and economic evaluation of a solar/gasdriven absorption chiller for shopping malls in the Caribbean region of Colombia *Case Studies in Thermal Engineering*. 2022;30:101743.
4. Xu Z.Y., Wang R.Z., Wang H.B. Experimental evaluation of a variable effect LiBr-water absorption chiller designed for high-efficient solar cooling system. *International Journal of Refrigeration*. 2015;59:135–143.
5. Nedaei N., Hamrang F., Garousi Farshi L. Design and 3E analysis of a hybrid power plant integrated with a single-effect absorption chiller driven by a heliostat field: A case study for Doha, Qatar. *Energy Reports*. 2022; 239: 122415.
6. Han B., Li W., Li M., Liu L., Song J. Study on LiBr/H₂O absorption cooling system based on enhanced geothermal system for data center. *Energy Reports*. 2020;6:1090–1098.
7. Jalili B., Rezaeian A., Jalili P., Ganji D.D. The hybrid absorption cooling-desalination and reverse osmosis system to boost energy utilization efficiency. *Energy Reports*. 2023; 9:5101–5110.
8. Chen J.F., Dai Y.J., Wang H.B., Wang R.Z. Experimental investigation on a novel air-cooled single effect LiBr-H₂O absorption chiller with adiabatic flash evaporator and adiabatic absorber for residential application. *Solar Energy*. 2018;159:579–587.
9. Salhi K., Korichi M., Ramadan K.M. Thermodynamic and thermo-economic analysis of compression-absorption cascade refrigeration system using low-GWP HFO refrigerant powered by geothermal energy. *International Journal of Refrigeration*. 2018; 94: 214–229.
10. Hu T., Kwan T.H., Pei G. An all-day cooling system that combines solar absorption chiller and radiative cooling. *Renewable Energy*. 2022;186: 831–844.
11. Li Z., Ye X., Liu J. Performance analysis of solar air cooled double effect LiBr/H₂O absorption cooling system in subtropical city. *Energy Conversion and Management*. 2014;85: 302–312.
12. Kamara S., Sulin A.B., Lysev V.I. Analytical study of the performance of a combined-type collector for solar heating and nocturnal radiative cooling. *Bulletin of the International Academy of Refrigeration*. 2022;1:26–36. DOI: 10.17586/1606 4313 2022 21 1-26-36 (In Russ.)
13. Lubis A., Jeong J., Saito K., Giannetti N., Yabase H., Alhamid M.I., Nasruddin N. Solar-assisted single-double-effect absorption chiller for use in Asian tropical climates. *Renewable Energy*. 2016; 99: 825–835.
14. Nasruddin N., Aisyah N., Alhamid M.I., Saha B.B., Sholahudin S., Lubis A. Solar absorption chiller performance prediction based on the selection of principal component analysis. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2019;13:100391.
15. Xu Z.Y., Wang R.Z. Comparison of CPC driven solar absorption cooling systems with single, double and variable effect absorption chillers. *Solar energy*. 2017;158: 511–519.
16. Marashli A., Alfanatseh E., Shalby M., Gomaa M.R. Modelling single-effect of Lithium Bromide-Water (LiBr-H₂O) driven by an evacuated solar tube collector in Ma'an city (Jordan) case study. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2022;37:102239.

17. Aguilar-Jimenez J.A., Velazquez-Limon N., Lopez-Zavala R., Gonzalez-Urbe L.A., Islas S., Gonzalez E., Ramirez L., Beltran R. Optimum operational strategies for a solar absorption cooling system in an isolated school of Mexico. *International Journal of Refrigeration*. 2020;112:1 – 13.
18. Martínez P.J., Martínez J.C., Martínez P. Performance comparison of solar autonomous and assisted absorption systems in Spain. *International Journal of Refrigeration*. 2016;71:85–93.
19. Ketfi O., Merzouk M., Kasbadji N.M., Bourouis M. Feasibility study and performance evaluation of low capacity water-LiBr absorption cooling systems functioning in different Algerian climate zones. *International Journal of Refrigeration*. 2017; 82:36–50.
20. Baranenko A.V., Bukharin N.N., Pekarev V.I., Timofeevsky L.S. Refrigeration Machines. St. Petersburg: Polytechnica, 2006: 944. (In Russ.)
21. Baranenko A.V., Timofeevsky L.S., Dolotov A.G., Popov A.V. Absorption Heat Converters. St. Petersburg: SPbSUT, 2005: 338. (In Russ.)
22. Malinina O.S., Baranenko A.V., Bayramov Sh.Z. Evaluation of the efficiency of a cooling system based on an absorption lithium bromide chiller with thermal energy storage // Proceedings of the 13th International Scientific and Technical Conference "Techniques and Technology of Petrochemical and Oil and Gas Production". Omsk: Omsk State Technical University, 2023; 41 – 42. (In Russ.)
23. Galimova L.V., Bayramov D.Z., Bayramov Sh.Z. Methodology for the preliminary design of a scientifically substantiated scheme for optimizing an energy-saving system based on a combined cycle power plant and an absorption lithium bromide chiller. *Refrigeration Technology*. 2020;1: 28–33. (In Russ.)
24. Velizhanin A.A., Mingaleeva R.D., Bessel V.V., Serovaysky A.Yu. Study of the structure and operating principle of a solar collector: Educational and Methodological Guide. – Moscow: Publishing Center of Gubkin Russian State University of Oil and Gas, 2023:74. (In Russ.)
25. Available:<https://globalsolaratlas.info/detail?c=46.321801,48.056602,11&s=46.346928,48.055573>. Global Solar Atlas, Accessed: Oct. 14, 2023.[Online].
26. Toropov A.L. Combined Thermal Solar Systems. Part 1. Thermal Solar Collectors for Individual and Decentralized Heating and Hot Water Supply Systems: Textbook. – Moscow: Publishing House of the Academy of Natural Sciences, 2019: 88. (In Russ.)

Сведения об авторах:

Александр Владимирович Бараненко, доктор технических наук, профессор; avbaranenko@itmo.ru, ORCID: 0000-0003-3675-9513

Ольга Сергеевна Малинина, кандидат технических наук, доцент; osmalinina@itmo.ru, ORCID: 0000-0002-1513-4672

Шамиль Загидович Байрамов, аспирант; bairamov.shamil@mail.ru, ORCID: 0009-0001-8090-3327

Information about authors:

Aleksandr V. Baranenko, Dr. Sci. (Eng.), Prof.; avbaranenko@itmo.ru, ORCID: 0000-0003-3675-9513

Olga S. Malinina, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof.; osmalinina@itmo.ru, ORCID: 0000-0002-1513-4672

Shamil Z. Bayramov, PhD Student; bairamov.shamil@mail.ru, ORCID: 0009-0001-8090-3327

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

Поступила в редакцию/Received 19.03.2025.

Одобрена после рецензирования/ Reviced 21.04.2025.

Принята в печать/Accepted for publication 22.04.2025.

ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА
ENERGY AND ELECTRICAL ENGINEERING

УДК 621.362: 537.322

DOI: 10.21822/2073-6185-2025-52-2-18-26



Оригинальная статья /Original article

**Охлаждающее термоэлектрическое устройство для лечения повреждений
позвоночника и спинного мозга**

О.В. Евдулов^{1,2}, С.Г. Гасанова¹, Г.А. Муталипова¹

¹Дагестанский государственный технический университет,

¹367015, г. Махачкала, проспект Имама Шамиля 70, Россия,

²Дагестанский государственный университет,

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

Резюме. Целью исследования является разработка охлаждающего термоэлектрического устройства (ТЭУ) для физиотерапевтических методов лечения повреждений позвоночника и спинного мозга, основанных на локальной гипотермии. **Метод.** Применены методы термодинамического анализа, натурного и вычислительного моделирования объектов криогенной техники. Целесообразным является применение охлаждающих ТЭУ, обладающих такими свойствами, как надежность, экологичность, бесшумность, функциональность и компактность. **Результат.** Предложена сегментарная конструкция охлаждающего ТЭУ, в состав одного сегмента которой входит теплоотводящее ребро, охлаждаемое ТЭМ, приводимое в тепловой контакт с травмированной областью позвоночника, непосредственно ТЭМ и радиатор для отвода теплоты от него. При необходимости используются несколько сегментов устройства, крепящиеся между собой с помощью специального приспособления. В процессе работы ТЭУ все радиаторы обдуваются вентиляторным агрегатом. Получены зависимости и построены графики, описывающие основные характеристики ТЭУ: изменение холодопроизводительности ТЭМ, холодильного коэффициента, напряжения питания от перепада температур между спаями термоэлементов для различных значений силы тока питания, зависимость напряжения на ТЭМ от величины тока питания при различных значениях перепада температур между спаями термоэлементов, а также зависимость холодильного коэффициента ТЭМ от тока питания. Графики представлены при температуре горячих спаев ТЭМ 45°C. **Вывод.** Для проведения лечебных процедур, связанных с локальной гипотермией травмированной области позвоночника может быть использован ТЭМ DRIFT-1,2 производства ООО «Криотерм», г. Санкт-Петербург. Параметры ТЭМ: рабочий диапазон мощностей единичного ТЭМ - от 37 до 60 Вт при среднем перепаде температур между спаями 35 К, ток питания - от 4,8 до 8,2 А при потребляемой мощности от 90 до 260 Вт, холодильный коэффициент - от 0,25 до 0,6.

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

Для цитирования: О.В. Евдулов, С.Г. Гасанова, Г.А. Муталипова. Охлаждающее термоэлектрическое устройство для лечения повреждений позвоночника и спинного мозга. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025;52(2):18-26. DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-2-18-26

Cooling thermoelectric device for the treatment of injuries of the spine and spinal cord

O.V. Evdulov^{1,2}, S.G. Gasanova¹, G.A. Mutalipova¹

¹Daghestan State Technical University,

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

²Daghestan State University,

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

Abstract. Objective. The aim of the study is to develop a cooling thermoelectric device for physiotherapeutic methods of treating spine and spinal cord injuries based on local hypothermia. **Method.** Methods of thermodynamic analysis, natural and computational modeling of cryogenic equipment are applied. It is advisable to use cooling TEUs that have the following properties: reliability, environmental friendliness, noiselessness, functionality and compactness. **Result.** A segmental design of a cooling TEU is proposed, one segment of which includes a heat-dissipating rib cooled by a TEU, brought into thermal contact with the injured area of the spine, a TEU and a radiator for removing heat from it. Several segments of the device are used, which are attached to each other using a special device. During CTED operation, all radiators are blown by a fan unit. The dependencies were obtained and graphs were constructed describing the main characteristics of the TEU: change in the refrigeration capacity of the TEM, the coefficient of performance, supply voltage from the temperature difference between the junctions of the thermoelements for different values of the supply current, the dependence of the voltage on the TEM on the supply current at different values of the temperature difference between the junctions of the thermoelements, as well as the dependence of the coefficient of performance of the TEM on the supply current. The graphs are presented at a temperature of the hot junctions of the TEM of 45 °C. **Conclusion.** The DRIFT-1.2 TEM manufactured by Krioterm LLC, St. Petersburg, can be used. TEM parameters: operating power range of a single TEM is from 37 to 60 W with an average temperature difference between junctions of 35 K, supply current is from 4.8 to 8.2 A with a power consumption of 90 to 260 W, cooling coefficient is from 0.25 to 0.6.

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

For citation: O.V. Evdulov, S.G. Gasanova, G.A. Mutalipova. Cooling thermoelectric device for the treatment of injuries of the spine and spinal cord. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2025;52(2):18-26. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-2-18-26

Введение. В настоящее время одной из приоритетных задач развития медицины в Российской Федерации является переход к персонализированной медицине, высокотехнологичному здравоохранению и технологиям здоровьесбережения, в том числе опирающимся на создание новых технических средств и методик их реализации для лечения различных заболеваний. Большое внимание уделяется использованию приборов и систем, реализующих физиотерапевтические методы лечения, основанные на применении разнообразных физических факторов. Данные методы активно применяются в консервативной терапии и обладают такими достоинствами, как высокая эффективность, возможность подключения внутренних резервов организма, универсальность действия, хорошая совместимость с другими лечебными средствами (например, медикаментозными), физиологичность, длительное последствие и т.п.

Одной из возможных и целесообразных областей применения физиотерапии является лечение повреждений позвоночника и отека спинного мозга. Проблема лечения больных, перенесших позвоночно-спинальную травму, является одной из самых сложных. Восстановление функций, утраченных вследствие повреждений позвоночника и спинного мозга, имеет не только медико-биологическое, но и социально-экономическое значение. В комплексе реабилитационных мероприятий при травматической болезни спинного мозга физиотерапии отводится основная роль.

Постановка задачи. Целью исследования является изучение физиотерапевтических методов лечения повреждений позвоночника и спинного мозга, в частности, основанных на локальной гипотермии, разработка охлаждающего термоэлектрического устройства (ТЭУ) для их реализации.

Методы исследования. Проведен обзор литературных источников, посвященных

лечению повреждений позвоночника и спинного мозга с помощью физиотерапевтических методов. Согласно проведенным исследованиям определено, что на сегодняшний день для лечения повреждений позвоночника используются такие методы физиотерапии, как механический массаж и гидромассаж, фонофорез, гальванизация, электрофорез, применение УФ излучения и СВЧ излучения, теплового воздействия, лазерная терапия, лечение магнитным полем и ультразвуком [1-4]. При этом в подавляющем числе случаев для предотвращения и лечения прогрессирующего отека спинного мозга, наблюдающегося после выполнения хирургических операций на позвоночнике, применяется локальная гипотермия. Положительные эффекты искусственной гипотермии описаны многими исследователями, которые обосновывали полученные положительные результаты увеличением толерантности ткани мозга к ишемии и гипоксии, уменьшением отека, снижением метаболической активности в поврежденных сегментах спинного мозга [5-8]. Так в случае локальной гипотермии при достижении температуры пораженной области спинного мозга 26-27 °С общее потребление кислорода тканями снижается на 40%, потребление кислорода мышцей сердца уменьшается на 50%, мозгом - на 33%, такое влияние метода обусловлено снижением метаболических процессов и уменьшением потребностей клеточных структур в кислороде. Все это ведет к интенсификации процесса выздоровления.

Для проведения процедур, связанных с локальным охлаждением травмированных областей позвоночника, применяются такие средства, как холодные компрессы, аппликаторы, криопакеты, криогели, зонды, охлаждаемые парокомпрессионными и абсорбционными установками, криосистемы, работающие на основе жидкого азота и других хладагентов [9, 10]. Их недостатками являются низкая эффективность и дискомфортность, сложность и неудобство в реализации, недостаточная точность дозировки охлаждающего воздействия, необходимость обязательного наличия криоагента, находящегося в специальном хранилище, значительные габаритные размеры, невозможность использования различных температурных режимов при проведении теплового воздействия.

В этих условиях, несмотря на то, что применение локального охлаждения при лечении заболеваний позвоночника имеет широкие возможности благодаря перечисленным преимуществам, на сегодняшний день техническая реализация такого воздействия остается на недостаточном уровне. Поэтому представляет интерес разработка новой аппаратуры для реализации лечебных процедур, связанных с локальной гипотермией поврежденных областей позвоночника.

В качестве таких технических средств перспективным является использование охлаждающих термоэлектрических приборов и устройств, позволяющих с высокой эффективностью осуществлять тепловое воздействие, отличающихся высокой надежностью работы, малыми габаритными размерами и высокой экологичностью, практически неограниченным ресурсом эксплуатации [11-16]. При этом необходимо отметить, что в данном направлении в настоящее время имеется существенный недостаток исследований, связанных с аппаратной частью охлаждающих средств, оптимизации их характеристик в соответствии со специфическими условиями эксплуатации. Это обстоятельство и определяет актуальность проведения исследований приборов данного типа.

При проведении локальной гипотермии поврежденной области позвоночника целесообразно использовать сегментарную конструкцию охлаждающего ТЭУ (рис. 1). В ней каждый сегмент включает в себя теплоотводящее ребро 1, имеющее ровную и изогнутую поверхности, выполненное либо цельнометаллическим (например из меди с титановым покрытием), либо в виде тепловой трубы с внутренней капиллярной структурой [17] (внешняя оболочка тепловой трубы также изготавливается из меди с титановым покрытием).

На ровную поверхность теплоотводящего ребра с обеспечением прочного механического и теплового контакта устанавливаются теплопоглощающими спаями термоэлектриче-

ский модуль (ТЭМ) 2, тепловыделяющие спаи которого сопрягаются с радиатором 3, питаемый энергией от управляемого источника постоянного электрического тока.

В зависимости от площади травмированной области могут использоваться несколько сегментов устройства, крепящиеся между собой с помощью специального приспособления. Например, это можно реализовать за счет применения в конструкции специальных колец 4, крепящихся по бокам теплоотводящего ребра, через которые при использовании нескольких сегментов пропускается стягивающий стержень. В процессе работы охлаждающего ТЭУ все радиаторы обдуваются вентиляторным агрегатом.

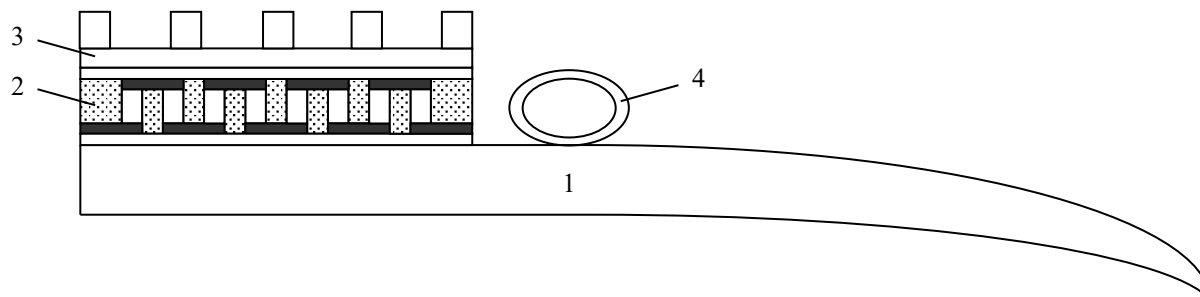


Рис. 1 - Структурная схема охлаждающего ТЭУ для лечения повреждений позвоночника и спинного мозга

Fig. 1 - Structural diagram of a cooling TEU for the treatment of spinal and spinal cord injuries

При лечении необходимое число сегментов в охлаждающем ТЭУ крепятся на теле пациента, а изогнутая часть теплоотводящего ребра приводится в тепловой контакт с травмированной областью позвоночника, причем сопряжение может осуществляться как через кожу, так и путем введения теплоотводящего ребра под ствол спинного мозга.

При пропускании через ТЭМ постоянного электрического тока, теплоотводящее ребро охлаждается и тем самым осуществляет локальную гипотермию участка позвоночника и спинного мозга. Для обеспечения надежной работы охлаждающего ТЭУ необходимо использование эффективных ТЭМ, которые могут обеспечить необходимый тепловой режим воздействия в соответствии с медицинским назначением.

Обсуждение результатов. Произведен расчет и подбор ТЭМ, которые могут обеспечить глубину охлаждения травмированного участка позвоночника в диапазоне от 25-28 °С, что удовлетворяет существующим медицинским рекомендациям. Основные параметры охлаждающего ТЭУ определены на основе инженерных расчетов, которые произведены с использованием программного комплекса Thermoelectric system calculation, (разработчик ООО «Криотерм», г. Санкт-Петербург) [18].

Установлено, что в качестве источника холода в устройстве целесообразно использовать ТЭМ типа DRIFT-1,2 производства этой же компании, характеристики которого приведены на рис. 2-6.

Они представляют собой зависимости холодопроизводительности ТЭМ $P_{\text{ТЭМ}}$, холодильного коэффициента ϵ , напряжения питания $U_{\text{ТЭМ}}$ от изменения перепада температур между его спаями $\Delta T_{\text{ТЭМ}}$ для различных значений силы тока питания $I_{\text{ТЭМ}}$, зависимость напряжения на ТЭМ от изменения силы тока питания при различных значениях перепада температур между его спаями, а также зависимость холодильного коэффициента ТЭМ от тока питания.

Графики представлены при температуре горячих спаев ТЭМ 45° С. Рабочий диапазон холодопроизводительности ТЭМ находится в пределах 37-60 Вт при среднем перепаде температур между спаями 35 К, ток питания составляет 4,8-8,2 А при потребляемой мощности 90-260 Вт. Холодильный коэффициент изменяется в пределах от 0,25 до 0,6.

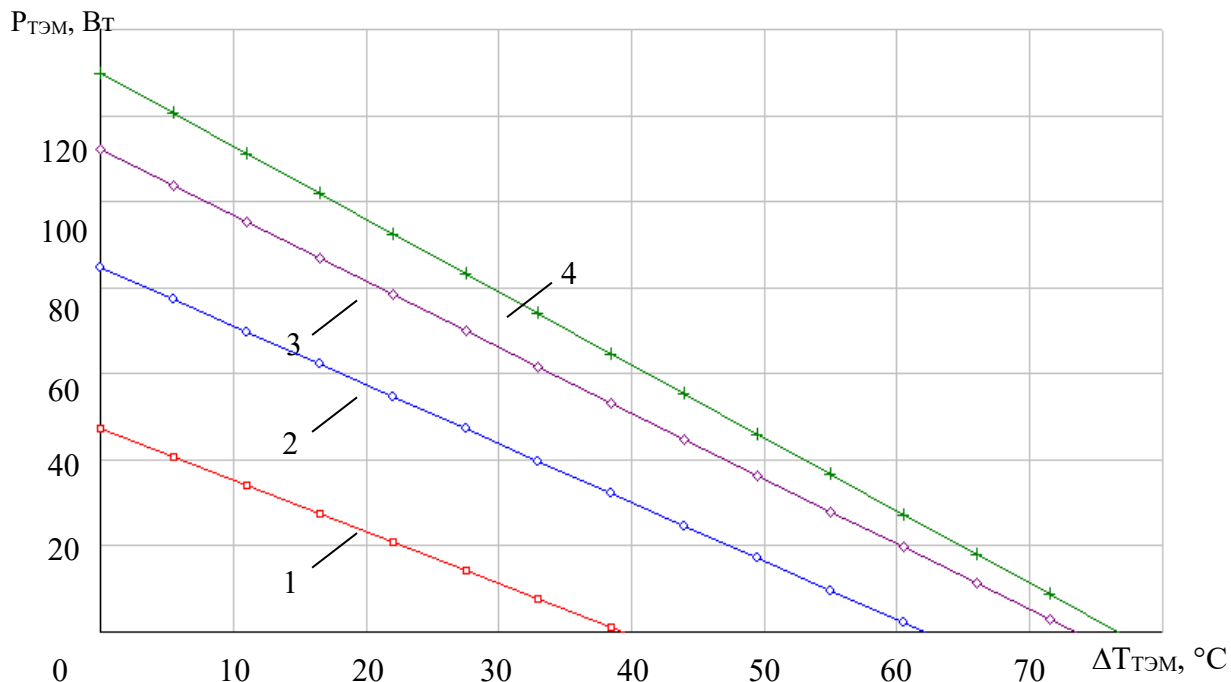


Рис. 2 - Зависимость холодопроизводительности ТЭМ от изменения перепада температур между его спаями при различных значениях силы тока питания:

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

Fig. 2 - Dependence of the refrigeration capacity of the TEM on the change in the temperature difference between its junctions at different values of the supply current:

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

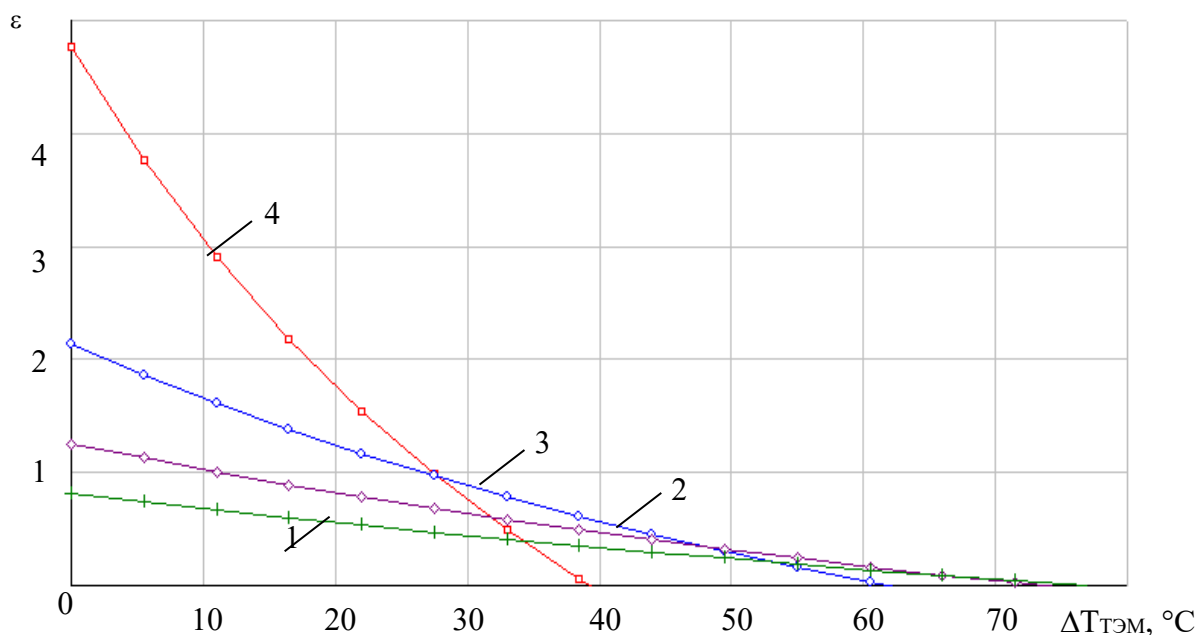


Рис. 3 - Зависимость холодильного коэффициента ТЭМ от изменения перепада температур между его спаями при различных значениях силы тока питания:

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

Fig. 3 - Dependence of the refrigeration coefficient of the TEM on the change in the temperature difference between its junctions at different values of supply current:

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

$U_{ТЭМ}$, В

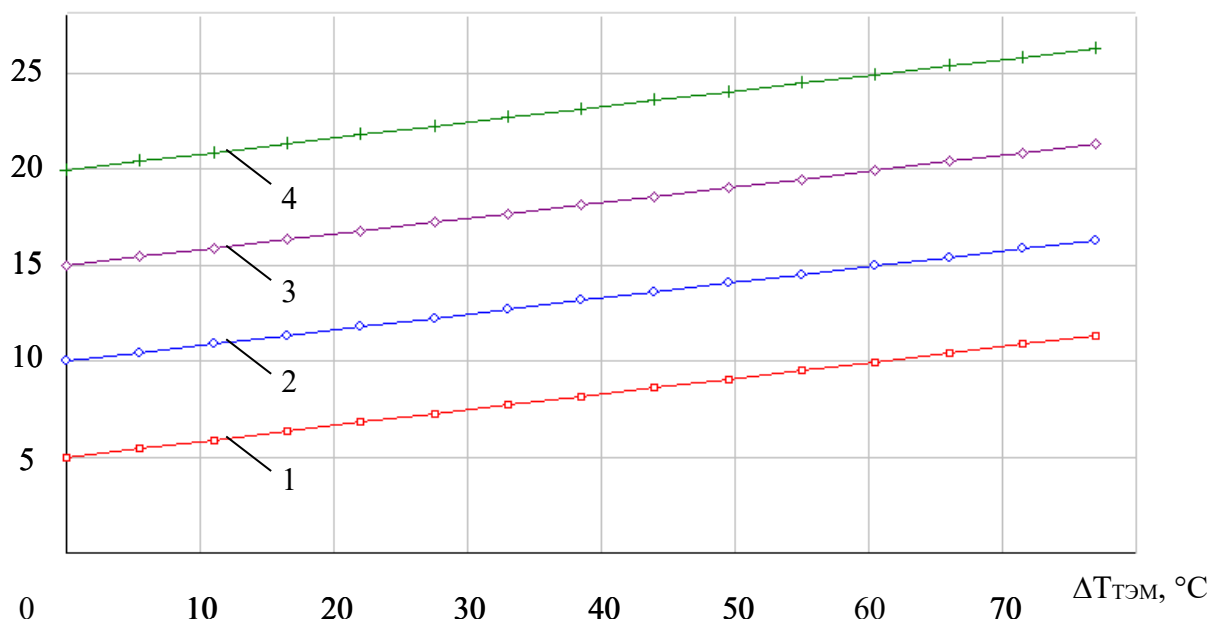


Рис. 4 - Зависимость напряжения питания ТЭМ от изменения перепада температур между его спаями при различных значениях силы тока питания:

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

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

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

$U_{ТЭМ}$, В

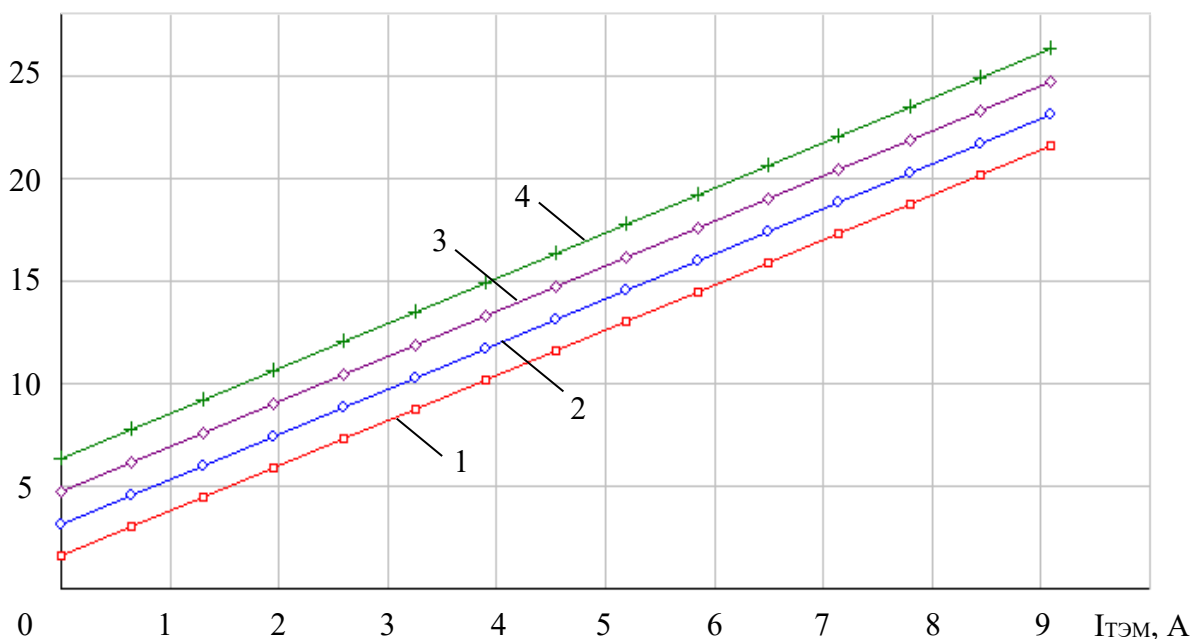


Рис. 5 - Зависимость напряжения ТЭМ от изменения величины тока питания при различных значениях перепада температур между его спаями:

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

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

1 - $\Delta T_{ТЭМ}=19.25$ К, 2 - $\Delta T_{ТЭМ}=38.5$ К, 3 - $\Delta T_{ТЭМ}=57.75$ К, 4 - $\Delta T_{ТЭМ}=77$ К

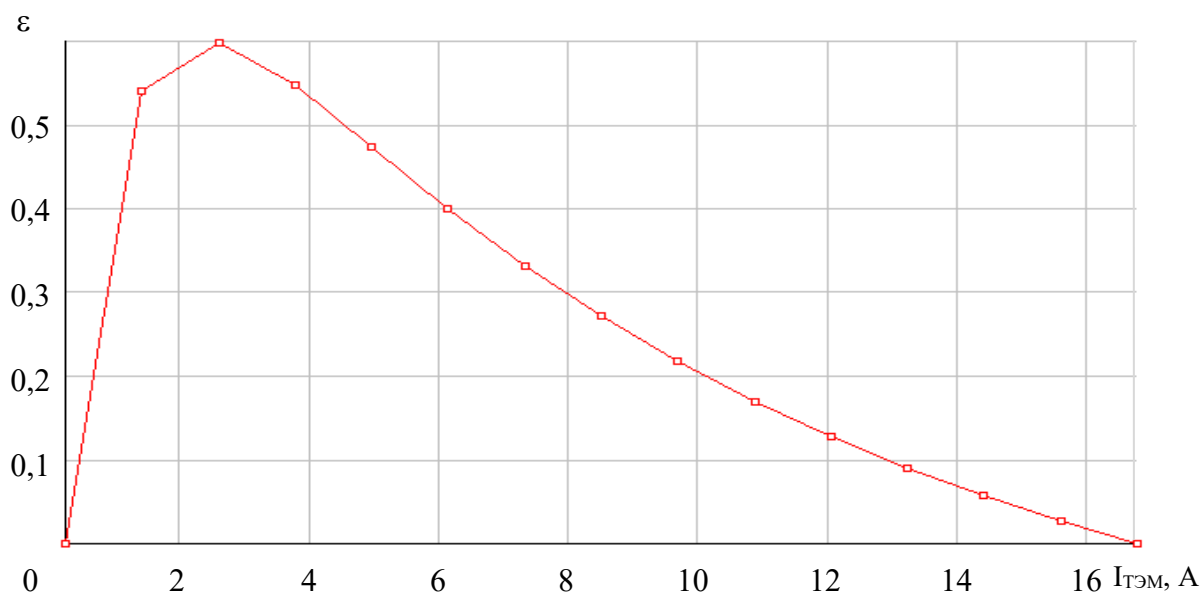


Рис. 6 - Зависимость холодильного коэффициента ТЭМ от тока питания
Fig. 6 - Dependence of the refrigeration coefficient of the TEM on the supply current

Представленная в статье конструкция позволяет обеспечить локальную гипотермию травмированной области позвоночника и спинного мозга в необходимых пределах. Рассмотренная конструкция охлаждающего ТЭУ будет обладать незначительными габаритными размерами, высокой точностью дозирования теплового потока, обеспечивать бесшумность, высокий ресурс работы и экологичность.

Вывод. Определено, что целесообразным для лечения данного заболевания является применение охлаждающих ТЭУ, обладающих такими свойствами, как надежность работы, экологичность, бесшумность, функциональность и компактность.

Предложена сегментарная конструкция охлаждающего ТЭУ, в состав одного сегмента которой входит теплоотводящее ребро, охлаждаемое ТЭМ, приводимое в тепловой контакт с травмированной областью позвоночника, непосредственно ТЭМ и радиатор для отвода теплоты от него.

При необходимости используются несколько сегментов устройства, крепящиеся между собой с помощью специального приспособления. В процессе работы охлаждающего ТЭУ все радиаторы обдуваются вентиляторным агрегатом.

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

Установлено, что для проведения лечебных процедур, связанных с локальной гипотермией травмированной области позвоночника может быть использован ТЭМ DRIFT-1,2 производства ООО «Криотерм», г. Санкт-Петербург.

Параметры ТЭМ следующие: рабочий диапазон мощностей единичного ТЭМ - от 37 до 60 Вт при среднем перепаде температур между спаями 35 К, ток питания - от 4,8 до 8,2 А при потребляемой мощности от 90 до 260 Вт, холодильный коэффициент - от 0,25 до 0,6.

Библиографический список:

1. Зубкова С.М. Роль тепловой компоненты в лечебном действии физических факторов // Физиотерапия, бальнеология и реабилитация. 2011. № 6. С.3-10.
2. Пономаренко Г.Н. Восстановительная медицина: фундаментальные основы и перспективы развития // Физическая и реабилитационная медицина. 2022. т. 4, № 1. С.8-20.
3. Боголюбов В.М. [и др.] Техника и методики физиотерапевтических процедур. М.:Бином, 2017. 464 с.
4. Ежов В.В. Физиотерапия и физиопрофилактика как методы и средства сохранения и восстановления здоровья // Физиотерапия, бальнеология и реабилитация. 2011. № 4. С.33-36.
5. Тумакаев Р.Ф. Гипотермия спинного мозга // Вопросы нейрохирургии. 2010. № 2. С. 51-54.
6. Pasquali P. Cryosurgery: a practical manual. New York: Springer, 2015. 441 p.

7. Цыганов Д.И. Криомедицина: процессы и аппараты. М.: САЙНС-ПРЕСС, 2011. 304 с.
8. Пат. 2681261 Российская Федерация, МПК А61В17/56. Устройство для лечения повреждений позвоночника и отека спинного мозга /Доценко И.А.; № 2017144747, заявл. 19.12.2017; опубл. 05.03.2019, Бюл. № 7.
9. Баранов А.Ю., Василенок А.В., Соколова Е.В., Чубова С.Д., Зиявидинов А.М. Выбор альтернативного криоагента для покрытия тепловой нагрузки в установке для общего криотерапевтического воздействия // Вестник Международной академии холода. 2022. № 1. С.76-82.
10. Будрик В.В. Основы криотерапии, криохирургии и криоконсервации. М: Лика, 2014. 190 с.
11. Assylbekova L., Aldiyarov N., Yevdulov O., Kuldeev N. Mathematical modeling of thermophysical processes in a thermoelectric device for cooling the brain // BioNanoScience. 2024. Vol. 14. P.1428-1441.
12. Евдулов О.В. Разработка устройств и систем для охлаждения на основе сильноточных термоэлектрических преобразователей энергии: специальность 05.04.03 «Машины и аппараты, процессы холодильной и криогенной техники, систем кондиционирования и жизнеобеспечения»: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Евдулов Олег Викторович, 2019. 330 с.
13. Евдулов О.В., Евдулов Д.В., Исабекова Т.И., Аминов Г.И., Аминова И.Ю. Математическая модель термоэлектрического устройства для лечения панариция методом местной гипотермии // Медицинская техника. 2022. № 2. С. 51-54.
14. Hu B., Shi X.-L., Chen Z.-G., Zou J. Thermoelectrics for medical applications: progress, challenges and perspectives // Chemical engineering journal. 2022. Vol. 437. P.135268.
15. Zaferani S.H., Ghomashchi R., Sams M.W., Chen Z.-G. Thermoelectric coolers as thermal management systems for medical application: design, optimization and advancement // Nano energy. 2021. Vol. 90. P. 106572.
16. Евдулов О.В., Магомедова С.Г., Миспахов И.Ш., Набиев Н.А., Насрулаев А.М. Термоэлектрическая система для извлечения инородных объектов из тела человека// Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019. т. 46, № 1. С. 32-41.
17. Пат. 2382617 Российская Федерация, МПК А61В18/02. Термоэлектрическое устройство для локальной гипотермии спинного мозга / Исмаилов Т.А., Рагимова Т.А., Исмаилов Р.Т.; № 2008129494, заявл. 17.07.2008; опубл. 27.02.2010, Бюл. № 6.
18. <http://www.kryotherm.ru> (дата доступа 26.03.2025).

References:

1. Zubkova S.M. The role of the thermal component in the therapeutic effect of physical factors. *Physiotherapy, balneology and rehabilitation*. 2011;6:3-10. (In Russ.)
2. Ponomarenko G.N. Restorative medicine: fundamental principles and development prospects. *Physical and rehabilitation medicine*. 202; 4(1):8-20. (In Russ.)
3. Bogolyubov V.M. [et al.] Technique and methods of physiotherapeutic procedures. Moscow: Binom, 2017. 464 p. (In Russ.)
4. Yezhov V.V. Physiotherapy and physioprevention as methods and means of maintaining and restoring health. *Physiotherapy, balneology and rehabilitation*. 2011;4:33-36. (In Russ.)
5. Tumakaev R.F. Spinal cord hypothermia. *Neurosurgical issues*. 2010; 2:51-54. (In Russ.)
6. Pasquali P. Cryosurgery: a practical manual. New York: Springer, 2015. 441 p.
7. Tsyganov, D.I. Cryomedicine: processes and devices. Moscow: SCIENCE-PRESS, 2011. 304 p. (In Russ.)
8. Patent. 2681261 Russian Federation, IPC A61B17/56. Device for the treatment of spinal injuries and spinal cord edema. Dotsenko I.A.; No. 2017144747, declared 12/19/2017; publ. 05.03.2019, Bulletin No.7. (In Russ.)
9. Baranov A.Yu., Vasilenok A.V., Sokolova E.V., Chubova S.D., Ziyavidinov A.M. Selection of an alternative cryoagent to cover the heat load in a unit for general cryotherapeutic action. *Bulletin of the International Academy of Refrigeration*. 2022;1:76-82. (In Russ.)
10. Budrik V.V. Fundamentals of cryotherapy, cryosurgery and cryopreservation. Moscow: Lika, 2014. 190 p. (In Russ.)
11. Assylbekova L., Aldiyarov N., Yevdulov O., Kuldeev N. Mathematical modeling of thermophysical processes in a thermoelectric device for cooling the brain. *BioNanoScience*. 2024;14:1428-1441.
12. Evdulov O.V. Development of devices and systems for cooling based on high-current thermoelectric energy converters: specialty 05.04.03 "Machines and apparatuses, processes of refrigeration and cryogenic engineering, air conditioning and life support systems": dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences / Evdulov Oleg Viktorovich, 2019. 330 p. (In Russ.)
13. Evdulov O.V., Evdulov D.V., Isabekova T.I., Aminov G.I., Aminova I.Yu. Mathematical model of a thermoelectric device for the treatment of panaritium by local hypothermia. *Medical equipment*. 2022; 2:51-54. (In Russ.)
14. Hu B., Shi X.-L., Chen Z.-G., Zou J. Thermoelectrics for medical applications: progress, challenges and perspectives. *Chemical engineering journal*. 2022; 437:135268.

15. Zaferani S.H., Ghomashchi R., Sams M.W., Chen Z.-G. Thermoelectric coolers as thermal management systems for medical application: design, optimization and advancement. *Nano energy*. 2021;90: 106572.
16. Evdulov O.V., Magomedova S.G., Mispakhov I.Sh., Nabiev N.A., Nasrulaev A.M. Thermoelectric system for extracting foreign objects from the human body. *Herald of the Dagestan State Technical University. Technical Sciences*. 2019; 46(1): 32-41. (In Russ.)
17. Patent. 2382617 Russian Federation, IPC A61B18/02. Thermoelectric device for local hypothermia of the spinal cord / Ismailov T.A., Ragimova T.A., Ismailov R.T.; No. 2008129494, declared. 17.07.2008; published. 27.02.2010, Bulletin No. 6. (In Russ.)
18. <http://www.kryotherm.ru> (accessed 26.03.2025). (In Russ.)

Сведения об авторах:

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

Сарабике Гусеновна Гасанова, аспирант кафедры теоретической и общей электротехники; ms.sarabike@mail.ru.

Гюльжаган Абдугамидовна Муталипова, ассистент кафедры радиотехники, телекоммуникаций и микроэлектроники; m.gulya3028@bk.ru

Information about the authors:

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

Sarabike G. Gasanova, Postgraduate Student, Department of Theoretical and General Electrical Engineering; ms.sarabike@mail.ru.

Gulzhagan A. Mutalipova, Assistant, Department of Radio Engineering, Telecommunications and Microelectronics; m.gulya3028@bk.ru.

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/ Received 27.03.2025.

Одобрена после рецензирования/ Revised 10.05.2025.

Принята в печать/ Accepted for publication 10.05.2025.

ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА
ENERGY AND ELECTRICAL ENGINEERING

УДК 621.592

DOI: 10.21822/2073-6185-2025-52-2-27-41



Оригинальная статья /Original article

Модификация цикла Mixed Fluid Cascade с рекуперацией теплоты обратных потоков рабочих веществ и оптимизированным давлением потока природного газа

А.Ю. Иконникова, А.Ю. Баранов, Ю.А. Кравченко, Д.В. Кравченко

Национальный исследовательский университет ИТМО,
197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский проспект, д. 49, Россия,
ООО «НПП «КРИОН»,
197349, г. Санкт-Петербург, Макулатурный пр., 4, литера А, Россия

Резюме. Цель. В работе представлены результаты исследования целесообразности рекуперации теплоты обратных потоков рабочих веществ цикла Mixed Fluid Cascade. Показано положительное влияние рекуперации теплоты на величину удельных затрат энергии на получение сжиженного природного газа. **Метод.** Исследование выполнено в формате математического моделирования работы цикла. Исследована работа цикла Mixed Fluid Cascade в базовом и модифицированном вариантах. Для организации рекуперации теплоты перегрева обратных потоков рабочих веществ в модифицированный вариант были добавлены теплообменные аппараты, расположенные в ступенях сжижения и переохлаждения, в которых обратные потоки рабочих веществ нагревались за счет подвода теплоты от прямых потоков. Также для дополнительного повышения энергоэффективности процесса был добавлен дожимающий компрессор сырьевого потока природного газа. **Результат.** В численном эксперименте изучено влияние выбора значения давления сырьевого потока природного газа, степени недорекуперации теплоты в дополнительных теплообменных аппаратах, выбора варианта включения теплообменных аппаратов в цикл на величину удельных затрат энергии и массового расхода рабочих веществ в ступенях внешнего охлаждения цикла. **Вывод.** Результаты исследования показали возможность перераспределения тепловой нагрузки цикла в сторону высокотемпературных ступеней, а также снижение удельных затрат энергии на получение сжиженного природного газа.

Ключевые слова: недорекуперация, энергоэффективность, сжиженный природный газ, повышенное давление, потери энергии

Для цитирования: А.Ю. Иконникова, А.Ю. Баранов, Ю.А. Кравченко, Д.В. Кравченко. Модификация цикла Mixed Fluid Cascade с рекуперацией теплоты обратных потоков рабочих веществ и оптимизированным давлением потока природного газа. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025;52(2):27-41. DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-2-27-41.

Modification of the Mixed Fluid Cascade cycle with heat recovery of the working fluid reverse flows and optimised natural gas flow pressure

A.Yu. Ikonnikova, A.Yu. Baranov, Yu.A. Kravchenko, D.V. Kravchenko

National Research University ITMO,
49 Kronverksky Ave., St. Petersburg 197101, Russia,
LLC "NPP "KRION",
4 Makulaturny Ave., litera A, St. Petersburg 197349, Russia

Abstract. Objective. The paper investigates the feasibility of heat recovery from reverse flows in the Mixed Fluid Cascade cycle, highlighting its positive impact on specific energy consumption for liquefied natural gas (LNG) production. **Method.** The study employs mathematical modeling to analyze both the basic and modified cycle operations. The modified version incorporates heat exchangers in the liquefaction and subcooling stages, allowing reverse flows to be heated

by direct flow heat. Additionally, a booster compressor for the feed natural gas flow is introduced to enhance energy efficiency. **Result.** The numerical experiments assess how variations in feed flow pressure, heat under-recovery in heat exchangers, and their configuration affect specific energy consumption and mass flow rates in the cycle's external cooling stages. Results indicate that thermal load can be redistributed towards high-temperature stages, leading to a reduction in specific energy consumption for LNG production. **Conclusion.** Overall, the research demonstrates the potential benefits of implementing heat recovery strategies in the Mixed Fluid Cascade cycle, contributing to more efficient LNG production processes.

Keywords: underrecovery, energy efficiency, liquefied natural gas, high pressure, energy losses

For citation: A.Yu. Ikonnikova, A.Yu. Baranov, Yu.A. Kravchenko, D.V. Kravchenko. Modification of the Mixed Fluid Cascade cycle with heat recovery of the working fluid reverse flows and optimised natural gas flow pressure. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2025;52(2):27-41. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-2-27-41

Введение. Развитие рынка мирового рынка сжиженного природного газа (СПГ) ставит перед российской отраслью ряд вызовов, среди которых ключевое место занимает потребность в разработке новых и совершенствование существующих технологических решений. Модификация известных и апробированных технологий производства СПГ представляет собой более рациональный подход по сравнению с созданием полностью новых систем. Во-первых, отечественная промышленность обладает значительным опытом в эксплуатации традиционных криогенных циклов сжижения природного газа, что позволяет совершенствовать и модернизировать технологические процессы без необходимости создания дополнительных производственных мощностей. Это способствует эффективному использованию существующей инфраструктуры. Во-вторых, такие усовершенствования могут быть реализованы с меньшими временными и финансовыми затратами, что особенно важно в условиях конкуренции с международными компаниями, продолжающими активное развитие своих технологий.

Для разработки и внедрения конкурентоспособных технологических решений, а также для снижения эксплуатационных издержек требуется минимизировать энергетические затраты за счет повышения общей эффективности технологических процессов. Модификация существующих технологий позволяет гибко адаптировать производственные процессы под специфические условия эксплуатации цикла получения СПГ в различных регионах России. В частности, для арктических проектов, где уже функционируют крупные СПГ-заводы, такие усовершенствования способствуют рациональному использованию специфических условий климата для повышения энергоэффективности процессов ожижения природного газа, повышению срока службы оборудования и улучшению его эксплуатационных характеристик.

Разработка и оптимизация криогенных циклов получения СПГ должна основываться на глубоком анализе основных источников энергетических потерь. Теория разработки криогенных циклов ожижения указывает [1,2] что причиной низкой эффективности технологических решений может быть недостаточная рекуперацией теплоты между обратными и прямыми потоками рабочих веществ цикла. На основе анализа энергетических потерь при ожижении криогенных газов установлены достаточно жесткие требования по допустимому значению разности температур прямого и обратного потоков, особенно для низкотемпературных ступеней охлаждения [3,4]. В то же время, обзор современной литературы посвященный анализу термодинамической эффективности циклов производства сжиженного природного газа, показывает что в ряде технологических решений рабочее вещество цикла поступает на сжатие в компрессор при температуре, которая существенно ниже температуры окружающей среды, что ведет к неизбежным и суще-

ственным энергетическим потерям от необратимости процессов. Тепловой анализ существующих циклов отвода теплоты, направленный на повышение эффективности процессов рекуперации и более рациональное использование энергии, могут существенно повысить рентабельность производства СПГ с использованием известных и апробированных технологических решений, что особенно важно в условиях ограниченного доступа зарубежным технологиям.

Постановка задачи. В качестве примера эффективности подобного подхода в данной работе рассматриваются тепловые процессы, протекающие при получении сжиженного природного газа в относительно новом цикле Mixed Fluid Cascade (MFC), который хорошо адаптируется к климатическим условиям северных регионов Российской Федерации и уже нашел практическое применение на отечественных предприятиях. В связи с этим цикл представляет оптимальную технологическую базу для поиска возможностей повышения энергоэффективности циклов производства СПГ, в том числе за счет сокращения потерь энергии, вызванных необратимыми термодинамическими процессами.

Особенностью цикла MFC является сочетание в одном технологическом решении двух альтернативных подходов к организации отвода теплоты при получении СПГ. Этот цикл использует классический каскадный принцип отвода теплоты с трех разных температурных уровней, в сочетании с использованием в ступенях каскада смешанных рабочих веществ, что позволяет реализовать многоступенчатое охлаждение природного газа с более низкими энергетическими затратами по сравнению с традиционными циклами сжижения. Однако, несмотря на признанное термодинамическое совершенство данного цикла [5], все еще существуют возможности повышения его энергетической эффективности за счет за снижения негативного влияния необратимых процессов. Основным источником потерь энергии в нем является недостаточная рекуперация теплоты между обратными и прямыми потоками смешанных рабочих веществ цикла.

Максимальная рекуперация между прямым и обратным потоками рабочего вещества является одним из основных условий высокой степени термодинамической эффективности криогенных циклов [3,6]. Эффективное использование теплоотводящей способности обратного потока для снижения теплосодержания потока высокого давления существенно уменьшает удельные затраты энергии в цикле. Для классических криогенных циклов сжижения газов эффективная рекуперация теплоты на всех ступенях охлаждения является определяющим фактором энергоэффективности. Однако, как показывает обзор научных работ посвященных получению СПГ [7-11], для внешних циклов отвода теплоты от природного газа, особенно для каскадных, высокие требования по степени рекуперации теплоты не считаются обязательными.

Основание для таких выводов дает анализ современных каскадных циклов ожижения природного газа, таких как Mixed Fluid Cascade, Арктический каскад и т.д. Из доступных в научных публикациях схем технологических процессов [12, 13] и их параметров видно, что в большинстве случаев при выходе из основного теплообменного аппарата низкотемпературной ступени охлаждения рабочее вещество направляется в компрессорную установку без предварительного подогрева до уровня близкого к температуре окружающей среды. В результате рабочее вещество поступает на сторону низкого давления компрессора с температурой, которая значительно ниже температуры потока высокого давления, который направляется в цикл после сжатия компрессором.

Более того, опубликованные данные о конструкции компрессорных установок проекта «Арктический каскад» [14] показывают, что компрессор разработан с учетом того, что температура этана на стороне впуска составляет не выше 170 К.

Возможно, пренебрежение потерями энергии из-за недорекуперации теплоты оправдано, с точки зрения разработчика компрессорного агрегата, некоторыми положительными

эффектами которые дает снижение температуры газового потока на входе в динамическую компрессорную машину. К таким позитивным эффектам можно отнести:

1. Увеличение производительности и напора компрессорной установки связанное с повышенной плотностью газа на входе в компрессор.

2. Отказ от использования сложных многопоточных теплообменных аппаратов, в которых обратный поток разогревается до температуры близкой к температуре окружающей среды. Например, в простом каскадном цикле получения СПГ для организации полноценной рекуперации теплоты всех рабочих веществ необходимо пропустить через теплообменник ступени предварительного охлаждения не менее 7 материальных потоков. Проектирование, производство и эксплуатация таких сложных теплообменных аппаратов представляет собой сложную теплотехническую задачу.

3. При заданной степени сжатия, подача на сторону низкого давления компрессора холодного потока рабочего вещества обеспечивает снижение температуры газа на стороне нагнетания, что уменьшает тепловую нагрузку на АВО. Также сжатие холодного потока позволяет избежать скачков температуры в компрессоре.

С другой стороны, нельзя не учитывать негативные последствия низкой степени рекуперации теплоты – потери холодопроизводительности из-за реализации необратимых процессов. Учитывая высокую теплоемкость рабочих веществ используемых в циклах внешнего охлаждения, разность температур между прямым и обратным потоками в 10 К, вызывает удельные потери холодопроизводительности порядка 20 кДж/кг. При этом, в Mixed Fluid Cascade рабочее вещество нижней ступени охлаждения поступает в компрессор с температурой, которая минимум на 100 К ниже температуры окружающей среды, т.е. удельные потери холодопроизводительности составляют не менее 200 кДж/кг.

Методы исследования. Предлагаемая модификация. При анализе цикла ожижения природного газа Mixed Fluid Cascade, обнаружены значительные потери теплоотводящей способности обратных потоков рабочего вещества. Так, в соответствии со схемой, изображенной на рис. 1, потоки смешанных рабочих веществ (СРВ) на входе в компрессор каждой ступени имеют температуру значительно ниже температуры окружающей среды (рис. 1 точки 11, 17, 22, 26).

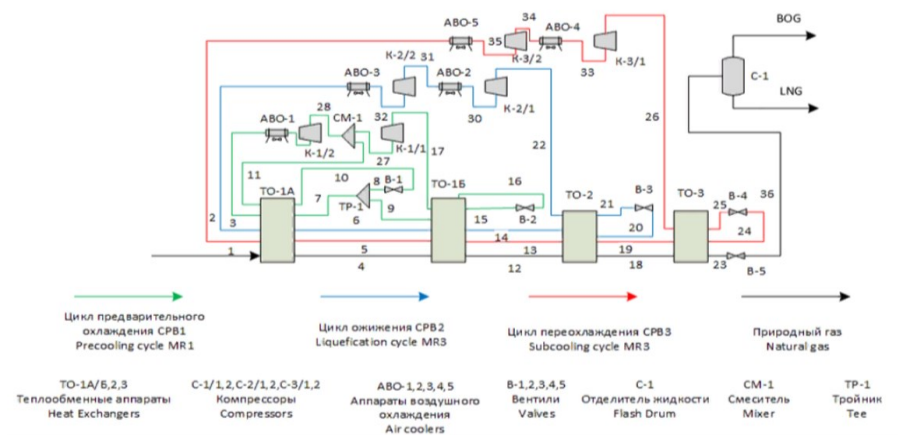


Рис. 1 - Технологическая схема цикла Mixed Fluid Cascade
Fig. 1 - Process flow diagram of the Mixed Fluid Cascade cycle

Точные значения температур потоков СРВ в этих узловых точках взяты из источника [15] и приведены в табл. 1. Величина недорекуперации обратных потоков в ступени предварительного охлаждения (точки 11 и 17) находится в пределах технологических рекомендаций ($15 \leq \Delta T_i = (T_{oc} - T_i) \leq 25 K$) [16], в оставшихся низкотемпературных ступенях обратные потоки рабочих веществ поступают в компрессор с большим недогревом ($\Delta T_{22} > 60 K$, $\Delta T_{26} > 120 K$). Можно предположить, что выбор параметров потока рабочего вещества на входе в компрессорную установку обоснован изложенными выше рациональными соображениями. Но, в соответствии с теорией проектирования криогенных циклов, потери

холодопроизводительности от недорекуперации наряду с поступлением теплоты из окружающей среды оказываю определяющее влияние на энергоэффективность циклов ожижения газов [17], поэтому следует проанализировать возможность снижения величины недорекуперации теплоты в низкотемпературных ступенях внешнего охлаждения цикла ожижения природного газа.

Таблица 1. Значения температур обратных потоков СРВ на выходе из ступени 1, 2 и 3 ступеней цикла, и расчетные значения потерь от недорекуперации при температуре окружающей среды $T_{o.c}=308\text{ K}$

Table 1. Temperature values of MR reverse flows at the outlet of stage 1, 2 and 3 stages of the cycle, and calculated values of losses from under-recovery, at ambient temperature $T_{o.s}=308\text{ K}$

Номер узловой точки цикла Cycle point number	Температура потока в узловой точке, К The temperature of the flow at the point, K	Недорекуперация потока, К Underrecovery of flow, K	Потери от недорекуперации, кДж/кг Losses from underrecovery, kJ/kg
26	186	122	188,93
22	241	67	102,36
17	279	29	49,79
11	298	10	1,02

С этой целью можно внести изменения в технологическую схему ожижения природного газа. Для снижения потерь холодопроизводительности от недорекуперации использовать для подогрева обратного потока рабочего вещества дополнительные двухпоточные теплообменные аппараты ТО-4 и ТО-5 (рис. 2), в которых источником теплоты будет часть прямого потока рабочего вещества. Это позволит не только отогреть обратные потоки до рекомендованного уровня, но и снизит тепловую нагрузку на ступени предварительного охлаждения.

Кроме этого, энергоэффективность модернизированного цикла получения СПГ можно увеличить за счет, повышения давления сырьевого потока на входе в цикл получения сжиженного природного газа. Показано [18], что оптимальное значение давления сырьевого потока для рассматриваемого цикла получения СПГ значительно выше 5–6 МПа, на которые обычно рассчитываются циклы ожижения. Увеличение давления сырьевого потока не только повышает энергоэффективность процесса получения СПГ, но и улучшает эксплуатационные условия для работы вспомогательного оборудования. При повышении давления интенсифицируются процессы сорбции высококипящих примесей в аппаратах блока подготовки сырьевого потока к сжижению, уменьшаются размеры теплообменных аппаратов и т.д. При этом, часть энергии затраченной при дожатии сырьевого потока возвращается при редуцировании товарного СПГ в гидравлических турбинах на выходе из блока ожижения [19].

Вариант модернизации цикла MFC с учетом высказанных выше рекомендаций представлен на рис. 2. В схему цикла получения СПГ включены дополнительные теплообменные аппараты ТО-4 и ТО-5, в которых обеспечивается отвод теплоты от прямых потоков и повышение температуры обратного потока в узловых точках 26 и 22. Схема дополнена дожимающим компрессором потока природного газа КПП. Температура сырьевого потока природного газа после компрессора КПП снижается до номинального уровня за счет внедрения в технологическую схему дополнительного конечного холодильника ХПП.

Для подтверждения целесообразности предложенных технологических изменений был поставлен численный эксперимент по оценке энергоэффективности модернизированной схемы получения СПГ.

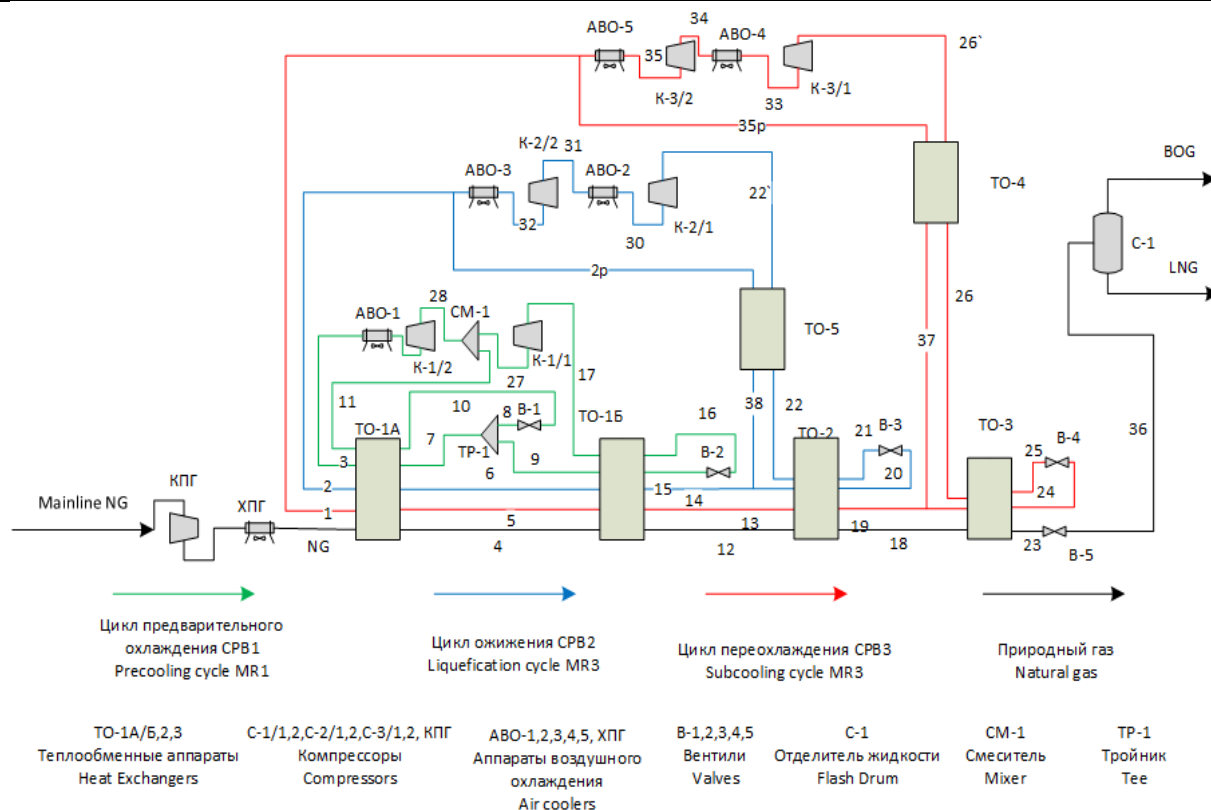


Рис. 2 - Технологическая схема оптимизированного цикла Mixed Fluid Cascade с теплообменными аппаратами для рекуперации теплоты обратных потоков

Fig. 2 - Process flow diagram of the optimised Mixed Fluid Cascade cycle with heat exchangers for heat recovery of reverse flows

Для проведения анализа энергоэффективности предложенной технологической схемы приняты следующие допущения:

1. Цикл ожижения получает сырьевой поток из экспортного магистрального газопровода с давлением 9,8 МПа. При этом, для сравнения показателей со стандартным вариантом цикла в эксперимент включена расчетная точка с давлением потока 5 МПа.
2. Температура и давление узловых точек, состав смешанных рабочих веществ приняты в соответствии данными приведёнными в [15].
3. Приток теплоты в дополнительных теплообменных аппаратах (ТО-4 и ТО-5) не учитывается.
4. Изотермический КПД компрессорных машин цикла принят равным 0,7.
5. Средняя степень повышения давления одной компрессорной ступени динамического типа принята равной 1,2. Для конечных ступеней степень повышения давления рассчитывается.

При проведении численного эксперимента по оценке эффективности предложенных изменений температура обратного потока смешанного рабочего вещества (СРВ) на входе в компрессорную установку изменялась с шагом 5 К. Выполнено две серии эксперимента. В первой серии исследовалась работа цикла с использованием дополнительного теплообменника ТО-4 только в низкотемпературной ступени охлаждения. Во второй серии эксперимента рассмотрено включение двух теплообменных аппаратов ТО-5 и ТО-4. Вариант с включением только одного теплообменного аппарата ТО-5 не рассматривался.

Определение степени рекуперации теплоты обратного потока. Доли массовых расходов, направляемых в теплообменные аппараты ТО-5 и ТО-4 вычисляются с учетом переменных значений температуры потоков СРВ2 и СРВ3 в точках 22' и 26' соответственно.

Доли температуры вычисляются исходя из энергетического баланса теплообменных аппаратов.

$$g_3 \cdot (h_{26'} - h_{26}) = g_3 \cdot x_3 \cdot (h_{35p} - h_{37}), \quad (1)$$

$$g_2 \cdot (h_{22'} - h_{22}) = g_2 \cdot x_2 \cdot (h_{2p} - h_{38}), \quad (2)$$

где g_3, g_2 – значения массового расхода потоков СРВ 3 и СРВ2 соответственно, x_3, x_2 – доли массовых потоков СРВ3 и СРВ2, направляемые в ТО-4 и ТО-5 соответственно.

Результаты расчета представлены в табл. 2 и 3.

Таблица 2. Доля прямого потока СРВ2, направляемая в ТО-5 при разных значениях температуры обратного потока на выходе из дополнительного теплообменника Т22'
Table 2. Fraction of direct flow of MR2 directed to TO5 at different values of reverse flow temperature at the outlet of the additional heat exchanger T22'

T 22'	241	251	261	271	281	291	301
x_2	0	0,04	0,07	0,11	0,15	0,19	0,23

Таблица 3. Доля прямого потока СРВ3, направляемая в ТО-4 при разных значениях температуры обратного потока на выходе из дополнительного теплообменника Т26'
Table 3. Fraction of direct flow of MR3 directed to TO4 at different values of reverse flow temperature at the outlet of the additional heat exchanger T26'

T 26'	186	196	206	216	226	236	246	256	266	276	286	296	306
x_3	0	0,03	0,07	0,1	0,14	0,17	0,2	0,24	0,27	0,31	0,34	0,38	0,42

Выбор оптимального решения. Для определения оптимальной степени рекуперации теплоты был выбран критерий минимизации энергетических затрат цикла. Потребителями энергии в цикле являются только компрессорные машины и аппараты воздушного охлаждения. Поскольку затраты энергии на АВО сравнительно малы, принято решение не учитывать их при расчете и не конкретизировать способ охлаждения потоков после сжатия. С учетом допущения оптимизация проводилась по мощности сжатия.

Поскольку сжатие производится в несколько ступеней с промежуточным охлаждением, затрачиваемая мощность в каждой ступени рассчитывалась отдельно. Сжатие в рамках одной ступени принято адиабатным, тогда удельная работа ступени:

$$l_i = \frac{k}{k-1} R T_n \left(\left(\frac{p_k}{p_n} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right), \quad (3)$$

где T_n – температура начала сжатия, p_k, p_n – конечное и начальное давления потока, $\eta_{из}$ – изотермический КПД компрессора (условно принятый равным 0,7), g – массовый расход сжимаемого потока.

Для определения количества ступеней сжатия n задана средняя степень повышения давления в одной ступени $z = 1,3$ исходя из того, что степень сжатия в одной ступени турбокомпрессора не превышает значений 1,2 – 1,3 при стандартных окружных скоростях. Тогда суммарная потребляемая мощность сжатия в одной ступени охлаждения:

$$N = \eta_{из} g \sum_{i=1}^n l_i, \quad (4)$$

где $\eta_{из}$ – изотермический КПД компрессора (условно принятый равным 0,7), g – массовый расход сжимаемого потока.

Для корректного определения затрат энергии и учета возможного позитивного влияния пониженной температуры потока на входе в ступень сжатия расчет был проведен по алгоритму представленному на рис. 3. Такая методика позволяет учесть влияние температуры на входе в компрессор на суммарное количество отводимой теплоты сжатия.

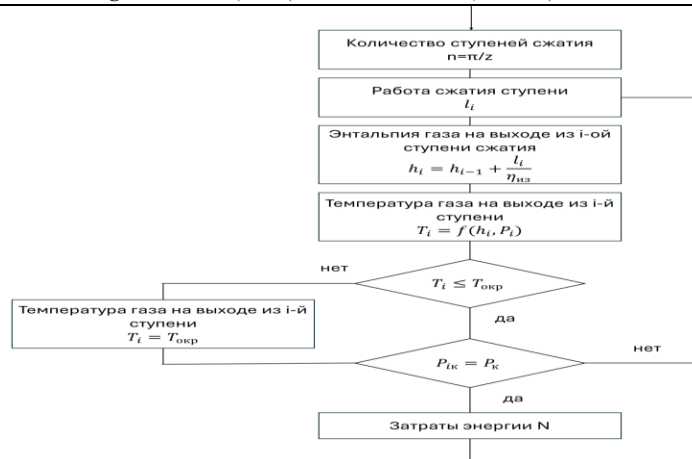


Рис. 3 - Алгоритм определения энергозатрат по ступеням сжатия

Fig. 3 - Algorithm for determining energy consumption by compression stages

Значения массового расхода смешанных рабочих веществ определялись из системы уравнений массовых балансов трех ступеней охлаждения:

$$\begin{cases} g_{\text{ПГ}} \cdot (h_{23} - h_{18}) = g_3 \cdot (h_{23} - h_{18} + h_{25} - h_{24}) \\ g_{\text{ПГ}} \cdot (h_{18} - h_{12}) + g_3 \cdot (1 - x_3) \cdot (h_{19} - h_{13}) = g_2 \cdot (h_{14} - h_{22} + h_{21} - h_{20}) \\ g_{\text{ПГ}} \cdot (h_4 - h_{\text{NG}}) + g_3 \cdot (1 - x_3) \cdot (h_5 - h_1) + g_2 \cdot (h_6 - h_2) = g_1 \cdot x_1 \cdot (h_{10} - h_{11}) + g_1 \cdot (h_3 - h_7) \end{cases} \quad (5)$$

где $g_{\text{ПГ}}, g_1, g_2, g_3$ – расходы потоков природного газа и СРВ1, СРВ2, СРВ3, x_1 – доля массового потока СРВ1, подаваемая на дроссельный вентиль В-1 (по заданным условиям 0,6).

Система уравнений (5) справедлива для варианта включения только теплообменника ТО-4, в случае параллельного включения ТО-5 и ТО-4 необходимо скорректировать уравнение баланса ТО1-А с учетом уменьшенного массового расхода потока СРВ2. Тогда система выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} g_{\text{ПГ}} \cdot (h_{23} - h_{18}) = g_3 \cdot (h_{23} - h_{18} + h_{25} - h_{24}) \\ g_{\text{ПГ}} \cdot (h_{18} - h_{12}) + g \cdot (1 - x_3) \cdot (h_{19} - h_{13}) = g_2 \cdot (h_{14} - h_{22} + h_{21} - h_{20}) \\ g_{\text{ПГ}} \cdot (h_4 - h_{\text{NG}}) + g_3 \cdot (1 - x_3) \cdot (h_5 - h_1) + g_2 \cdot (1 - x_2) \cdot (h_6 - h_2) = g_1 \cdot x_1 \cdot (h_{10} - h_{11}) + g_1 \cdot (h_3 - h_7) \end{cases} \quad (6)$$

Из совместного решения уравнений (1)–(6) были получены зависимости затрат энергии каждой ступени и цикла в целом от значений температуры обратных потоков на входе в компрессорную установку.

Обсуждение результатов. Включение в цикл теплообменного аппарата рекуперации ступени переохлаждения. В соответствии с представленными в табл. 3 параметрами потока в точке 26', произведено моделирование работы цикла с включением теплообменного аппарата ТО-4. Для каждого из вариантов давления сырьевого потока и степени рекуперации теплоты определены расходы смешанных рабочих веществ (СРВ) и энергетические затраты ступеней внешнего охлаждения.

В результате, полученные значения полных энергетических затрат, учитывающих также затраты энергии на дожатие потока сырьевого газа представлены на рис. 4. Включение в цикл теплообменного аппарата ТО-4 теоретически позволяет снизить удельные энергетические затраты на производство единицы СПГ. Так, при стандартном базовом давлении потока сырьевого газа (5 МПа) [20] при максимальной степени рекуперации теплоты обратного потока СРВ3 можно снизить удельные затраты энергии с от исходных 0,35 кВтч/кг СПГ [21] до 0,25 кВтч/кг СПГ, а при повышении давления потока сырьевого газа до 15 МПа - удельные затраты энергии уменьшаются до уровня 0,2 кВтч/кг.

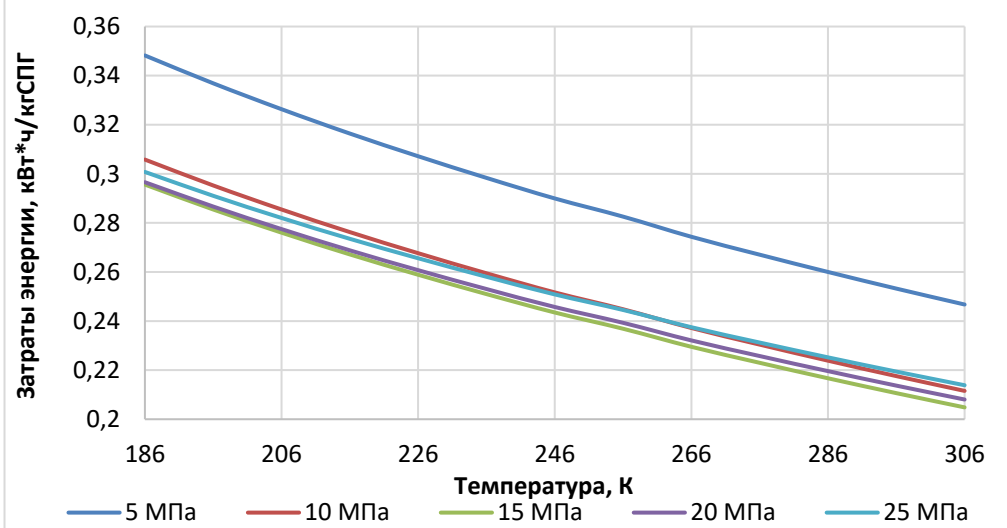


Рис. 4 - Суммарные затраты энергии цикла при различных значениях степени рекуперации теплоты между прямым и обратным потоками СРВ3
Fig. 4 - Total cycle energy input at different values of the degree of heat recovery between the forward and reverse flows of MR3

В то же время с ростом давления сырьевого потока на входе в цикл ожижения уменьшается относительный энергетический выигрыш. Включение дополнительного ТО в ступень переохлаждения (СРВ 3) приводит к снижению удельных энергетических затрат в ступени на 24% вне зависимости от давления сырьевого потока.

При этом наименьшее значение удельных затрат энергии достигается в случае максимальной рекуперации теплоты обратного потока СРВ 3 и дожатии потока природного газа до уровня 25 МПа (рис.5).

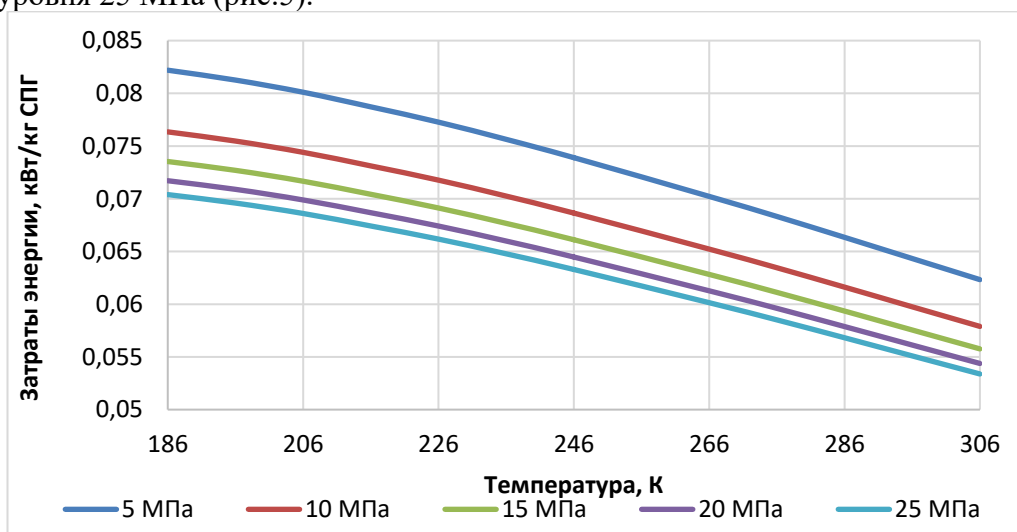


Рис. 5 - Зависимость энергетических затрат ступени переохлаждения от степени рекуперации теплоты между прямым и обратным потоками СРВ3
Fig. 5 - Dependence of energy costs of the subcooling stage on the degree of heat recovery between direct and reverse flows of MR3

При увеличении степени рекуперации теплоты между прямым и обратным потоками СРВ 3 в других ступенях также наблюдается заметное снижение удельной мощности привода компрессоров.

Так, для ступени сжижения максимальное снижение минимальная величина затрат энергии наблюдается при достижении постигается в варианте когда температуры потока в точке 26' максимально близка к температуре окружающей среды (рис. 6). Повышение давления сырья от 5 МПа до 25 МПа до позволяет снизить удельные затраты энергии на 29% – 38% .

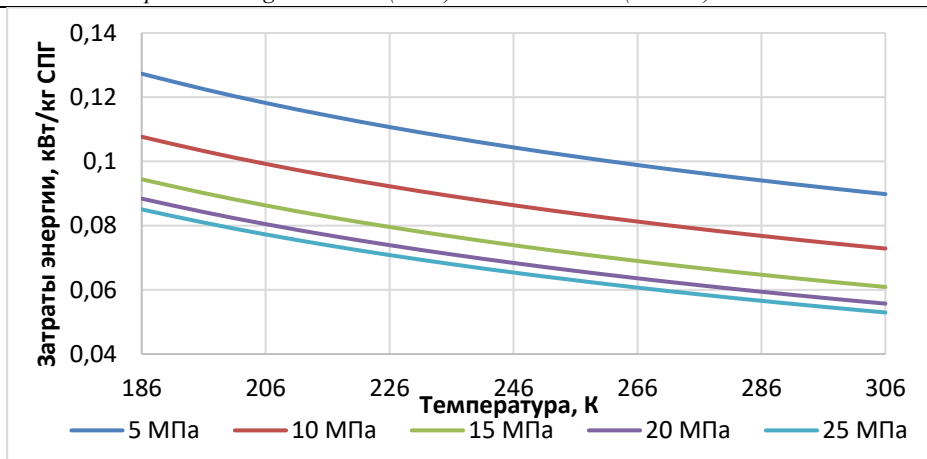


Рис. 6 - Зависимость энергетических затрат ступени от степени рекуперации теплоты между прямым и обратным потоками СРВ 3

Fig. 6 - Dependence of stage energy costs on the degree of heat recovery between direct and reverse flows of MR3

Повышение степени рекуперацией теплоты обратного потока смешанного рабочего вещества аналогично влияет на энергоэффективность работы ступени предварительного охлаждения, как видно из рис. 7. При поступлении смешанного рабочего вещества в компрессорную установку на более высоком температурном уровне затраты энергии снижаются существеннее. По мере увеличения давления сырья величина снижения энергозатрат возрастает от 32% до 38% при условии максимальной рекуперации между потоками СРВ3.

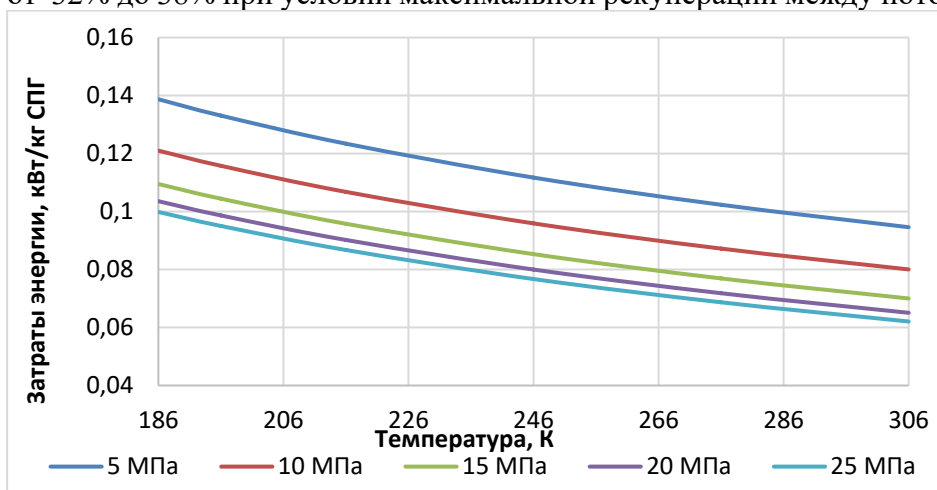


Рис. 7 - Зависимость энергетических затрат ступени предварительного охлаждения от степени рекуперации теплоты между прямым и обратным потоками СРВ 3

Fig. 7 - Dependence of energy costs of the pre-cooling stage on the degree of heat recovery between the forward and reverse flows of MR3

Одновременное включение в цикл теплообменных аппаратов для рекуперации в ступенях переохлаждения и сжижения. Для анализа влияния рекуперации теплоты потоков СРВ2 было необходимо определить оптимальный вариант рекуперации теплоты потоков СРВ3 и зафиксировать определенный температурный уровень потока в точке 26'. Несмотря на то, что максимальное снижение затрат энергии достигается при $T_{26'} = 306$ К, следует признать, что достижения недорекуперации всего и получение разности температур потоков на уровне в 2 К на высоком температурном уровне технологически недостижимо и неоправданно практически, поэтому на основе технологических рекомендации по проектированию криогенных циклов [1] температура потока СРВ в точке 26' зафиксирована на уровне 296 К. Результаты определения суммарных энергетических затрат при одновременном включении в цикл ТО-4 и ТО-5 представлены на рис. 8.

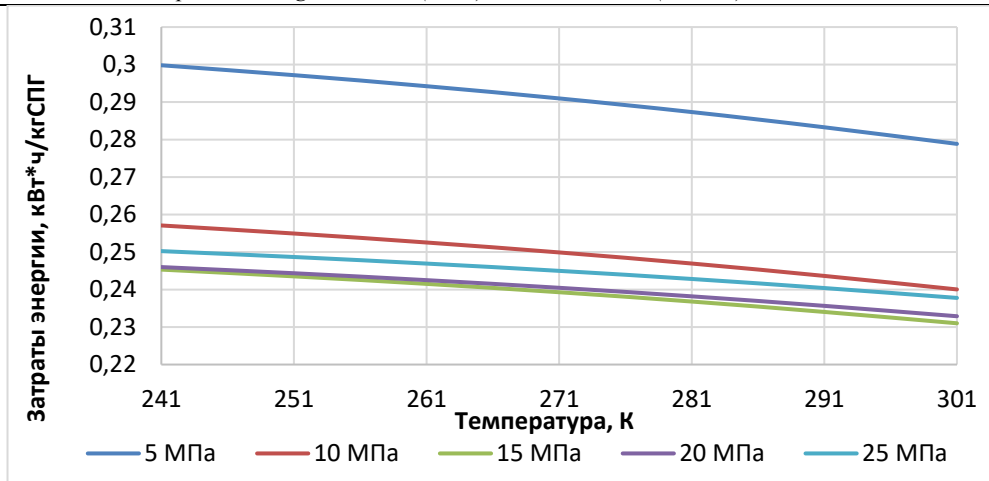


Рис. 8 - Суммарные удельные затраты энергии цикла от степени рекуперации теплоты между прямым и обратным потоками СРВ 2

Fig. 8 - Total specific cycle energy inputs from the degree of heat recovery between the forward and reverse flows of MR2

В результате рекуперации теплоты обратного потока СРВ 2 удельные энергозатраты возможно снизить на 5% – 7% . При этом наибольший относительный выигрыш в энергии наблюдается при давлении 5 МПа. В то же время, наименьшее значение затрат энергии соответствует варианту с максимальной рекуперацией теплоты потоков СРВ 3 и давлением сырьевого потока 15 МПа.

На рис. 9 представлены результаты расчета удельных энергозатрат в ступени сжижения.

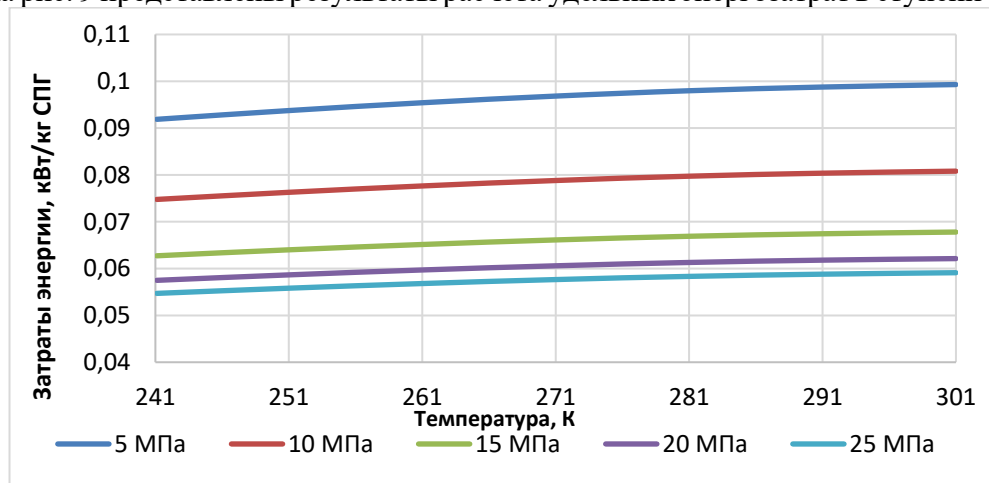


Рис. 9 - Зависимость энергетических затрат ступени сжижения от степени рекуперации теплоты обратного потока СРВ2

Fig. 9 - Dependence of energy costs of the liquefaction stage on the degree of heat recovery of reverse flow MR2

Увеличение температуры потока СРВ на входе в компрессорную установку ступени внешнего охлаждения вызывает рост удельных затрат энергии в компрессоре на 8%. Незначительный рост энергозатрат может быть обусловлен увеличением массового СРВ2.

В то же время, перераспределение материальных и тепловых потоков связанное с внедрением в цикл дополнительной теплообменной аппаратуры, позитивно сказывается на энергетических показателях ступени предварительного охлаждения (рис. 10).

При базовом давлении сырьевого потока 5 МПа [15] снижение удельных затрат энергии составило порядка 18% – 20%, что несколько меньше, чем при увеличении степени рекуперации потока СРВ3 (рис. 7). Сопоставление результатов исследования двух вариантов рекуперации теплоты представлено на рис. 11.

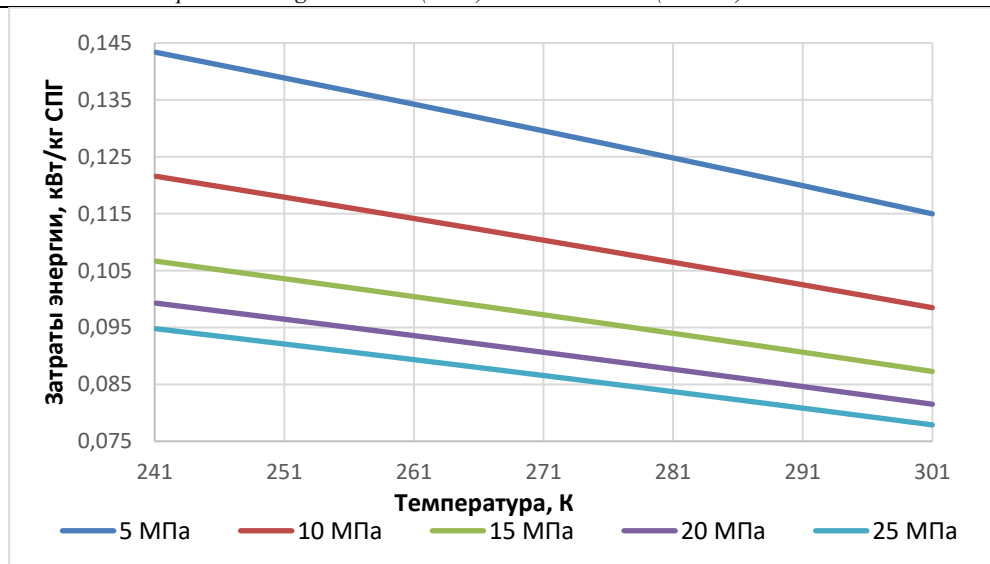


Рис. 10 - Зависимость энергетических затрат ступени предварительного охлаждения от степени рекуперации теплоты обратного потока СРВ2

Fig. 10 - Dependence of energy costs of the pre-cooling stage on the degree of heat recovery of reverse flow MR2

Исходя из наблюдаемых зависимостей становится понятным, что наблюдаемое ранее снижение энергозатрат при рекуперации теплоты потока СРВ2 в действительности является только относительным. Неэффективность рекуперации теплоты обратного потока ступени сжижения вызвана перераспределением тепловой нагрузки в сторону высокотемпературных ступеней.

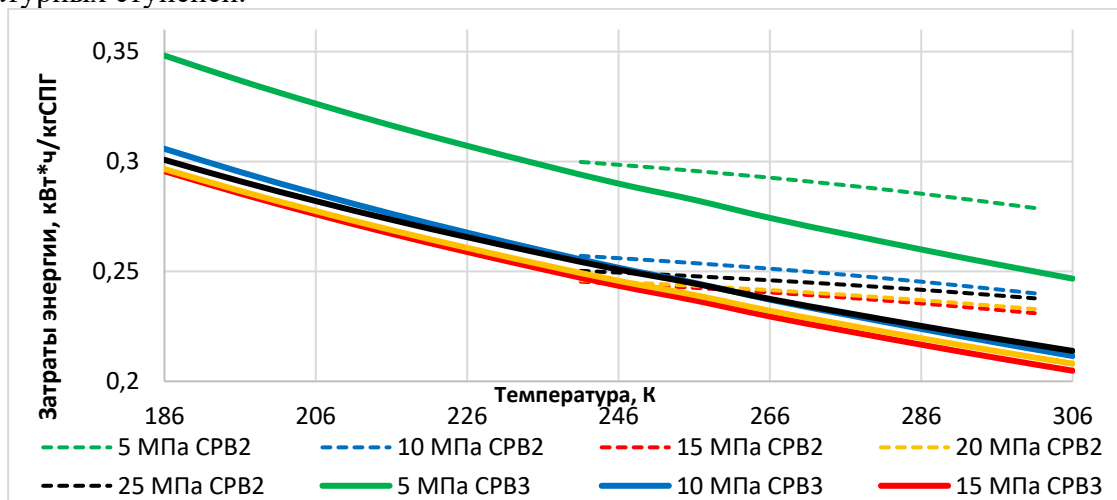


Рис. 11 - Определение оптимальной степени рекуперации теплоты обратных потоков СРВ2 и СРВ3

Fig. 11 - Determination of the optimum degree of heat recovery of reverse flows MR2 and MR3

Суммарные энергозатраты на сжатие в цикле с рекуперацией теплоты только потоков СРВ3 имеют меньшие значения. В то же время для обоих вариантов оптимальное значение давления сырьевого потока лежит в диапазоне от 15 МПа до 20 МПа, что значительно выше стандартного давления 5 МПа [15].

Наименьшее технически достижимое значение затрат энергии при рекуперации потока СРВ3 составляет 0,21 кВт час/кг СПГ, соответствует температуре в точке 26` 296 К и давлению потока природного газа 15 МПа. Аналогично, при рекуперации также потока СРВ2 затраты энергии составят 0,23 кВт ч/ кг СПГ при температуре в точке 22` 301 К и давлении сырья 16 МПа.

Вывод. По результатам исследования были получены зависимости удельных затрат энергии на получение СПГ при включении в технологическую схему дополнительных теплообменных аппаратов ТО-5 и ТО-4, обеспечивающих различную степень рекуперации теплоты между прямыми и обратными потоками СРВ3 и СРВ2.

Рекуперация теплоты между прямыми и обратными потоками СРВ позволяет существенно сократить удельные затраты энергии на получение СПГ, что является следствием снижения тепловой нагрузки ступеней внешнего охлаждения за счет использования теплоотводящей способности обратных потоков и снижения доли прямых потоков, направляемых через теплообменную аппаратуру высокотемпературных ступеней.

Рекуперация между прямыми и обратными потоками СРВ3 существенно снижает энергетическую нагрузку ступеней предварительного охлаждения и сжижения. В то же время включение в цикл теплообменного аппарата ТО-5 негативно сказывается на энергетических показателях цикла.

Давление потока сырья дополнительно увеличивает энергоэффективность цикла, что с учётом ранее выполненных исследований позволяет говорить об универсальной эффективности этого технологического приема. Несмотря на то, что в настоящее время активно высказывается мнение о необходимости построения упрощенных технологических решений даже при условиях снижения энергоэффективности процессов [23], что оправдывается сложившейся тяжелой ситуацией в отрасли в связи с отсутствием импортного или отечественного оборудования. Однако, с точки зрения перспективы и с учетом увеличения темпов реинжиниринга и конструирования новых собственных машин и аппаратов стоит продолжать поиск технологических решений, направленных на повышение энергетической эффективности производства.

Включение дополнительных теплообменных аппаратов и сырьевой компрессорной установки не представляет высокой технологической сложности, но позволяет существенно снизить затраты энергии на производство СПГ.

Библиографический список:

1. Архаров И.А., Александров А.А., Навасардян Е.С. Теория и расчет циклов криогенных систем. 2009.
2. Новотельнов В.Н. Криогенные машины / В.Н. Новотельнов, Суслов А.Д., Полтараус В.Б. – СПб.: Политехника, 1991. – 335 с.
3. Архаров А.М., Сычев В.В., Архаров И.А. Сопоставление результатов термодинамического анализа энергетических потерь в высокотемпературных и низкотемпературных системах, машинах и установках//Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана, спецвыпуск «Холодильная и криогенная техника, системы кондиционирования и жизнеобеспечения. – 2008.
4. Kronberg A. et al. Theoretical limits on the heat regeneration degree//International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2020. – Т. 161. – С. 120282. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120282>
5. Pereira M.A.M. et al. Energy and economic comparison of five mixed-refrigerant natural gas liquefaction processes//Energy Conversion and Management. – 2022. – Т. 272. – С. 116364 <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116364>
6. Streit J.R., Razani A. Second-law analysis and optimization of reverse brayton cycles of different configurations for cryogenic applications//AIP Conference Proceedings. – American Institute of Physics, 2012. – Т. 1434. – №. 1. – С. 1140-1148. <https://doi.org/10.1063/1.4707035>
7. Люгай Д.В., Шайхутдинов А.З., Мутовин Ю.Г., Одишария Г.Э. Проблемные вопросы разработки и реализации проектов СПГ//Вести газовой науки. 2017. № 1 (29).
8. Andress D.L., Watkins R.J. Beauty of simplicity: Phillips optimized cascade LNG liquefaction process //Advances in Cryogenic Engineering: Transactions of the Cryogenic Engineering Conference-CEC. – 2004. – Т. 49. – С. 91-100. <https://doi.org/10.1063/1.1774671>
9. Wu X. et al. A critical analysis of natural gas liquefaction technology//Fluid Dynamics and Materials Processing. – 2021. – Т. 18. – №. 1. – С. 145-158. <https://doi.org/10.32604/fdmp.2022.018227>.
10. Nagy M. Techno-economic analysis of LNG production alternatives. – 2016.(электронный ресурс) URL : <https://thesis.unipd.it/handle/20.500.12608/28143?mode=simple> .
11. Федорова Е.Б. Современное состояние и развитие мировой индустрии сжиженного природного газа: технологии и оборудование. – 2011.

12. Василевич В.В., Федосеев П.О., Бричка К.М., Шотиди К.Х. Сравнительный анализ современных технологий крупнотоннажного производства сжиженного природного газа. //Газовая промышленность. 2017. № 9 (757). С. 53–57 :
13. Zhang J. et al. Comprehensive review of current natural gas liquefaction processes on technical and economic performance//Applied Thermal Engineering.–2020.–Т.166.–С.114736. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114736>
14. Merkulov V.I. Analysis of Russian Arctic LNG projects and their development prospects//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2020. – Т. 940. – №. 1. – С. 012114. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/940/1/012114>
15. Vatani A., Mehrpooya M., Palizdar A. Advanced exergetic analysis of five natural gas liquefaction processes//Energy conversion and management. – 2014. – Т. 78. – С. 720-737. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.11.050>
16. Архаров А.М., Буткевич И.К. Криогенные машины и инструменты. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2015.
17. Архаров А.М. Основы криологии. Энтропийно-статистический анализ низкотемпературных систем. – 2014.
18. Автор (2024) Optimization of Mixed Fluid Cascade Natural Gas Liquefaction Plant Feed Stream Pressure //Problemele Energeticii Regionale. – 2024. – Т. 61. – №. 1. – С. 111-126. <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2024.1-61.10>
19. Helgestad D.E. Modelling and optimization of the C3MR process for liquefaction of natural gas//Process Systems Engineering. – 2009. – Т. 44. (электронный ресурс) URL: https://skoge.folk.ntnu.no/diplom/prosjekt09/helgestad/Helgestad_project.pdf
20. Bauer H.C. Mixed fluid cascade, experience and outlook//Paper 25a, 12th Topical Conference on Gas Utilization, AIChE 2012 Spring Meeting, Houston, Texas. – 2012;2. electronic resource) URL:https://www.researchgate.net/profile/Heinz-Bauer/publication/277191917_Mixed_Fluid_Cascade_Experience_and_Outlook/links/55644f2108ae9963a11f246f/Mixed-Fluid-Cascade-Experience-and-Outlook.pdf
21. Waldmann I.B. Evaluation of process systems for floating LNG production units. In: Tekna conference; 2008
22. Иванова, К.С. Перспективы и проблемы развития производства и сбыта СПГ в России / К.С. Иванова //Проблемы экономики и управления нефтегазовым комплексом. – 2019. – № 7(175). – С. 46-50. – [https://doi.org/10.33285/1999-6942-2019-7\(175\)-46-50](https://doi.org/10.33285/1999-6942-2019-7(175)-46-50)

References:

1. Arkharov I.A., Aleksandrov A.A., Navasardyan E.S. Theory and calculation of cycles of cryogenic systems. S. Theory and calculation of cycles of cryogenic systems. - 2009. (In Russ)
2. Novotel'nov, V.N. Cryogenic machines / V.N. Novotel'nov, A.D. Suslov, V.B. Poltarau - SPb.: Politehnika, 1991. - 335 с. (In Russ)
3. Arkharov A.M., Sychev V.V., Arkharov I.A. Comparison of the results of thermodynamic analysis of the energy losses in the high-temperature and low-temperature systems, machines and installations//Vestnik of the Moscow State Technical University named after N.E. Bauman, special issue 'Refrigerating and cryogenic engineering, air-conditioning and life-support systems. - 2008. (In Russ)
4. Kronberg A. et al. Theoretical limits on the heat regeneration degree. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2020;161:120282. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120282>
5. Pereira M.A.M. et al. Energy and economic comparison of five mixed-refrigerant natural gas liquefaction processes. *Energy Conversion and Management*. 2022;272:116364 <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116364>
6. Streit J.R., Razani A. Second-law analysis and optimization of reverse brayton cycles of different configurations for cryogenic applications//AIP Conference Proceedings. *American Institute of Physics*, 2012; 1434(1):1140-1148. <https://doi.org/10.1063/1.4707035>
7. Lyugai D.V., Shaikhutdinov A.Z., Mutovin Yu.G.G., Odisharia G.E. Problematic issues of development and implementation of LNG projects . *Vesti gazovoy nauki*. 2017;1(29). (In Russ)
8. Andress D.L., Watkins R.J. Beauty of simplicity: Phillips optimized cascade LNG liquefaction process //Advances in Cryogenic Engineering: Transactions of the Cryogenic Engineering Conference-CEC. 2004; 49: 91-100. <https://doi.org/10.1063/1.1774671>
9. Wu X. et al. A critical analysis of natural gas liquefaction technology. *Fluid Dynamics and Materials Processing*. 2021;18(1):145-158. <https://doi.org/10.32604/fdmp.2022.018227>.
10. Nagy M. Techno-economic analysis of LNG production alternatives. – 2016. (electronic resource) URL: <https://thesis.unipd.it/handle/20.500.12608/28143?mode=simple> .
11. Fedorova E.B. Current state and development of the global industry of liquefied natural gas: technologies and equipment. - 2011. (In Russ)
12. Vasilevich V.V., Fedoseev P.O.O., Brichka K.M., Shotidi K.H. Comparative analysis of modern technologies of large-capacity production of liquefied natural gas. *Gas Industry*. 2017;9(757):53-57 (In Russ)

13. Zhang J. et al. Comprehensive review of current natural gas liquefaction processes on technical and economic performance. *Applied Thermal Engineering*. 2020;166:114736. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114736>
14. Merkulov V.I. Analysis of Russian Arctic LNG projects and their development prospects //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2020;940(1):012114. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/940/1/012114>
15. Vatani A., Mehrpooya M., Palizdar A. Advanced exergetic analysis of five natural gas liquefaction processes. *Energy conversion and management*. 2014;78:720-737. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.11.050>
16. Arkharov A.M., Butkevich I.K. Cryogenic machines and tools//M.: Bauman Moscow State Technical University. - 2015. (In Russ)
17. Arkharov A.M. Fundamentals of Cryology. Entropy-statistical analysis of low-temperature systems. - 2014. (In Russ)
18. Autor (2024) Optimisation of Mixed Fluid Cascade Natural Gas Liquefaction Plant Feed Stream Pressure *Problemele Energeticii Regionale*. 2024;61(1): 111-126. <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2024.1-61.10> (In Russ)
19. Helgestad D.E. Modelling and optimization of the C3MR process for liquefaction of natural gas//*Process Systems Engineering*. 2009;44. (electronic resource) URL: https://skoge.folk.ntnu.no/diplom/prosjekt09/helgestad/Helgestad_project.pdf
20. Bauer H.C. Mixed fluid cascade, experience and outlook //Paper 25a, 12th Topical Conference on Gas Utilization, AIChE 2012 Spring Meeting, Houston, Texas. – 2012;2. electronic resource) URL:https://www.researchgate.net/profile/Heinz-Bauer/publication/277191917_Mixed_Fluid_Cascade_Experience_and_Outlook/links/55644f2108ae9963a11f246f/Mixed-Fluid-Cascade-Experience-and-Outlook.pdf
21. Waldmann I.B. Evaluation of process systems for floating LNG production units. In: Tekna conference; 2008
22. Ivanova, K.S. Prospects and problems of development of LNG production and sales in Russia / K.S. Ivanova. *Problems of economics and management of oil and gas complex*. 2019;7(175):46-50. – [https://doi.org/10.33285/1999-6942-2019-7\(175\)-46-50](https://doi.org/10.33285/1999-6942-2019-7(175)-46-50)

Сведения об авторах:

Анастасия Юрьевна Иконникова, старший лаборант, ассистент, аспирант, образовательный центр «Энергоэффективные инженерные системы», aikonnikova@itmo.ru; ORCID 0000-0003-2665-5788

Александр Юрьевич Баранов, доктор технических наук, профессор, образовательный центр «Энергоэффективные инженерные системы»; abaranov@itmo.ru; ORCID 0000-0002-9263-8153

Юлия Андреевна Кравченко, аспирант, ассистент, образовательный центр «Энергоэффективные инженерные системы»; jasolonina@itmo.ru; ORCID 0000-0002-5564-9312

Денис Владимирович Кравченко, аспирант, ассистент, образовательный центр «Энергоэффективные инженерные системы»; dvkravchenko@itmo.ru; ORCID 0000-0003-3675-5678

Information about authors:

Anastasia Yu. Ikonnikova, Senior Lab Assistant, Assistant, Postgraduate Student, Educational Center "Energy Efficient Engineering Systems", aikonnikova@itmo.ru; ORCID 0000-0003-2665-5788

Alexander Yu. Baranov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Educational Center "Energy Efficient Engineering Systems"; abaranov@itmo.ru; ORCID 0000-0002-9263-8153

Yulia A. Kravchenko, Postgraduate Student, Assistant, Educational Center "Energy Efficient Engineering Systems"; jasolonina@itmo.ru; ORCID 0000-0002-5564-9312

Denis V. Kravchenko, Postgraduate Student, Assistant, Educational Center "Energy Efficient Engineering Systems"; dvkravchenko@itmo.ru; ORCID 0000-0003-3675-5678

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 25.04.2025.

Принята в печать/Accepted for publication 25.06.2025.

ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА
ENERGY AND ELECTRICAL ENGINEERING

УДК 542.455

DOI: 10.21822/2073-6185-2025-52-2-42-51



Оригинальная статья /Original article

**Особенности применения и расчета режимов работы тепловых труб в составе
низкотемпературных установок и систем жизнеобеспечения**

А.В. Колинко, М.В. Шамаров, А.О. Галанин, И.И. Юрченко, Р.А. Жлобо, А.С. Зайцев

Кубанский государственный технологический университет,
350072, г. Краснодар, ул. Московская, д. 2, Россия

Резюме. Цель. В связи с нарастающим дефицитом источников энергии, а также с усилением тренда бережного отношения к окружающей среде, всё большую эффективность приобретают различные методы и технологии, способствующие наиболее рациональному использованию энергии, в том числе, используемой в низкотемпературных установках и системах жизнеобеспечения (кондиционирования). Целью исследования является разработка оптимальной конструкции теплоутилизатора, способной к интеграции в низкотемпературную установку или систему кондиционирования. **Метод.** Исследование основано на применении энергосберегающих технологий при создании машин и аппаратов холодильной и криогенной техники, систем кондиционирования и жизнеобеспечения, в том числе за счет утилизации тепла. **Результат.** На основании проведенного анализа процессов теплообмена, расчетов конструктивных параметров и коэффициентов теплопередачи спроектирован опытный образец низкотемпературного рекуператора из теплообменных труб. **Вывод.** Исследование истинных параметров и режимов работы опытного образца рекуператора предусмотрено в составе экспериментальной установки. Планируется разработать методику проектного расчета для проектирования рекуператоров из тепловых труб для работы в составе низкотемпературной установки систем кондиционирования. Применение статистических методов является важным инструментом в процессе проектирования и улучшения технических решений, позволяющим достичь высокой эффективности и экономичности новых типов теплообменников – рекуператоров.

Ключевые слова: теплоутилизация, ресурсосбережение, фазовый переход, энергоэффективность, тепловые трубы, низкотемпературные машины, холодильный агент, коэффициенты теплоотдачи

Для цитирования: А.В. Колинко, М.В. Шамаров, А.О. Галанин, И.И. Юрченко, Р.А. Жлобо, А.С. Зайцев. Особенности применения и расчета режимов работы тепловых труб в составе низкотемпературных установок и систем жизнеобеспечения. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025; 52(2):42-51. DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-2-42-51

Features of application and calculation of operating modes of heat pipes in low-temperature installations and life support systems

A.V. Kolinko, M.V. Shamarov, A.O. Galanin, I.I. Yurchenko, R.A. Zhlobo, A.S. Zaitsev

Kuban State Technological University,
2 Moskovskaya St., Krasnodar 350072, Russia

Abstract. Objective. Various methods and technologies that facilitate the most rational use of energy, including that used in low-temperature installations and life support systems (air conditioning), are becoming increasingly effective. The aim of the study is to develop an optimal design of a heat recovery unit capable of integration into a low-temperature installation or air conditioning system. **Method.** The study is based on the use of energy-saving technologies in the creation of machines and devices for refrigeration and cryogenic equipment, air conditioning and life support systems, including through heat recovery. **Result.** A prototype of a low-temperature

recuperator made of heat exchange pipes has been designed. **Conclusion.** The study of the parameters and operating modes of the prototype recuperator is provided for in the experimental setup. It is planned to develop a methodology for designing recuperators for operation in a low-temperature air conditioning system installation. The use of statistical methods is a tool for improving technical solutions, allowing to achieve the efficiency of heat exchangers - recuperators.

Keywords: heat recovery, resource saving, phase transition, energy efficiency, heat pipes, low-temperature machines, refrigerant, heat transfer coefficients

For citation: A.V. Kolinko, M.V. Shamarov, A.O. Galanin, I.I. Yurchenko, R.A. Zhlobo, A.S. Zaitsev. Features of application and calculation of operating modes of heat pipes in low-temperature installations and life support systems. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2025;52(2):42-51. (In Russ). DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-2-42-51

Введение. Утилизация теплоты в низкотемпературных установках (кондиционирования, холодильных машинах) - это важный аспект, который может существенно повлиять на социально-экономическое развитие Краснодарского края и, особенно, на его курортные зоны. Утилизация этой теплоты позволяет повысить общую энергоэффективность зданий и сооружений, а значит, снижает потребление электроэнергии. Это важно в условиях роста цен на энергоресурсы и стремления к снижению углеродного следа [1, 11]. В указанной сфере потенциал утилизации тепла вытяжного воздуха может быть использован для снижения энергопотребления, а также снижения выбросов теплоты в атмосферу, что положительно скажется на состоянии окружающей среды. Современные рабочие вещества, применяемые в сфере низкотемпературных установок и систем кондиционирования, обладают свойствами, позволяющими их применять для целей теплоутилизации при помощи механизма фазового перехода в закрытой испарительно-конденсационной камере. Данное свойство обусловлено уникальным механизмом работы исследуемого процесса теплотрансформации, аналогов которому на рынке теплоутилизаторов не представлено [2,17].

Постановка задачи. Проведение исследований различных видов рабочих веществ с целью выявления наиболее подходящего для целей применения в устройстве теплоутилизатора, позволит разработать оптимальную конструкцию теплоутилизатора, способную к интеграции в низкотемпературную установку или систему кондиционирования [6].

Методы исследования. Тепловая труба, представляет собой устройство для переноса тепла из одной зоны в другую при малом градиенте температуры [1].

В общем виде, тепловая труба представляет собой герметично закрытую трубу или камеру самой разнообразной формы, внутренняя поверхность которой может быть выложена капиллярно пористым слоем – фитилем, но также может эксплуатироваться и без фитилей (рис. 1).

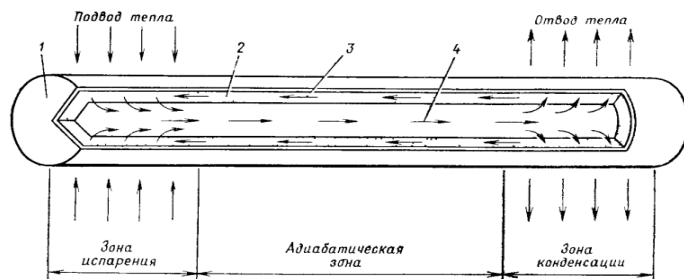


Рис. 1 – Схема и принцип действия тепловой трубы:

1 – корпус, 2 – фитиль, 3 – поток жидкости, 4 – поток пара

Fig. 1 – Scheme and principle of operation of the heat pipe:

1 – body, 2 – wick, 3 – liquid flow, 4 – steam flow

Тепло, поступающее от внешнего источника тепла к испарителю, вызывает испарение теплоносителя на этом участке трубы. Возникающая при этом разность давлений побуждает пар двигаться от испарителя к конденсатору, где он конденсируется, отдавая при

этом тепловому стоку на этом участке трубы скрытую теплоту парообразования. Количество теплоты, которое может быть перенесено в виде скрытой теплоты парообразования, обычно на несколько порядков выше количества, которое может быть перенесено в виде энтальпии рабочей жидкости в обычной конвективной системе.

Хотя тепловые трубы в принципе могут иметь различные конфигурации поперечных сечений, наиболее употребительной является труба с круглым поперечным сечением. Трубы круглого сечения, изготовленные из разнообразных материалов, имеются в широком ассортименте, такая конфигурация труб наиболее эффективна с точки зрения прочности. Диаметр трубы, необходимый для данных условий применения, должен быть определен так, чтобы скорость пара не превышала определенных значений [15].

Контроль скорости пара необходим потому, что при высоких числах Маха благодаря сжимаемости потока пара возникает большой температурный градиент в осевом направлении. Для удобства тепловая труба может быть рассчитана так, чтобы максимальное число Маха в паровом канале не превышало 0,2.

При этих условиях пар можно считать несжимаемым, а температурный градиент в осевом направлении становится пренебрежимо малым [1]. Для тепловой трубы требование к переносу тепловой мощности, и, следовательно, максимальный тепловой поток в осевом направлении $Q_{\max}$ известны, необходимый диаметр парового канала при числе Маха парового потока $M = 0,2$ может быть определен из уравнения:

$$d_v = \left(\frac{20 \cdot Q_{\max}}{\pi \cdot \rho_v \cdot \lambda \cdot \sqrt{\gamma_v \cdot R_v \cdot T_v}} \right)^{1/2}, \quad (1)$$

где d_v - диаметр парового канала; $Q_{\max}$ - максимальный осевой тепловой поток; ρ_v - плотность пара; γ_v - отношение удельных теплоемкостей; λ - скрытая теплота парообразования; R - газовая постоянная для пара; T - температура пара.

Данное уравнение может быть использовано при проведении конструкторских расчетов для определения диаметра парового канала. Наиболее широко используемой методикой расчета корпусов тепловых труб, испытывающих внутреннее давление, является нормативный метод ASME для необогреваемых сосудов давления [2]. Норматив ASME определяет, что максимальное допустимое напряжение при любой температуре должно быть равно одной четверти предельного напряжения на разрыв при данной температуре. Для круглых труб, у которых толщина стенки меньше 10% диаметра, максимальное напряжение давления достаточно точно описывается приближенным уравнением:

$$f_{\max} = \frac{P \cdot d_0}{2t}, \quad (2)$$

где $f_{\max}$ - максимальное окружное напряжение в стенке; P - разница давлений в стенке; d_0 - наружный диаметр трубы; t - толщина стенки трубы.

Если толщина стенки полусферической крышки составляет менее 10% ее диаметра, уравнение может быть упрощено: $f_{\max} = \frac{P \cdot d_0}{4t}$. (3)

При конструкторских расчетах внутреннее давление в трубе составляет давление насыщенного пара теплоносителя нерабочей температуре трубы или максимальное давление цикла, которое выше. Избыточное давление равно давлению пара минус давление в окружающей среде. Максимальное допустимое напряжение растяжения равно одной четверти предельно допустимого напряжения *растяжения*. Зная наружный диаметр трубы, который равен периметру парового канала плюс допустимая толщина фитиля и стенок корпуса, можно, используя уравнения (2) и (3), вычислить толщину стенки и крышек корпуса.

Методика использования этих данных для расчета корпусов тепловой трубы состоит в следующем. Определив диаметр парового канала, можно приближенно вычислить наружный диаметр элемента тепловой трубы. При этих условиях осевыми изменениями динамического давления пара можно пренебречь и градиент давления пара в направлении движения может быть вычислен по уравнению

$$\frac{dP_v}{dx} = -F_v \cdot Q \quad (4)$$

Здесь коэффициент трения в паровом потоке определяется уравнением

$$F_v = \frac{8 \cdot \mu_v}{\pi \cdot r_v^4 \cdot \rho_v \cdot \lambda}, \quad (5)$$

где r_v - радиус парового канала, а μ_v , ρ_v , λ - параметры свойств пара.

Для условий рекуперации теплоты в системы приточно-вытяжной вентиляционной установки проводим расчет параметров тепловой трубы, использованной в составе воздушного рекуператора. Исходные параметры для расчета элемента тепловой трубы составляют: максимальное количество передаваемой теплоты одного элемента составляет 50 Вт тепла при 303К, длина тепловой трубы составляет 0,8 м, половину которой составляет испаритель, другую – конденсатор, в качестве теплоносителя использован холодильный агент R600, материалом для тепловой трубы принимаем медь. По таблицам данных термодинамических и теплофизических параметров хладагента R600 [4, 5] определяются необходимые параметры для расчета диаметра тепловой трубы по формуле 1:

- плотность пара холодильного агента $\rho_v = 9,630 \text{ кг/м}^3$;
- отношение удельных теплоемкостей $\gamma_v = 1,345$;
- скрытая теплота парообразования $\lambda = 315 \text{ кДж/кг}$;
- газовая постоянная для пара R = 143,2 Дж/кгК [12].

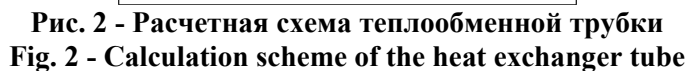
На основании формулы (1) полученный диаметр тепловой трубы одного элемента составил – 0,0197 м. Размеры корпуса тепловой трубы теперь могут быть определены следующим образом. При 303К давление насыщенных паров R600 составляет 0,3697 МПа, а предельное напряжение на разрыв для меди равно $1,24 \cdot 10^8 \text{ Н/м}^2$.

Таким образом, при внешнем диаметре трубы 0,0191м и толщине стенки $1,24 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ отношение d_0/d_t равно 1,15 и $d_{вн}$ равно 0,0166м. Такая труба окончательно выбирается в качестве корпуса тепловой трубы. При 0,3697 МПа и предельном напряжении на разрыв, равном $1,24 \cdot 10^8 \text{ Н/м}^2$, отношение толщины стенки к диаметру концевой крышки составляет 0,08. Следовательно, требуемая толщина стенки составит $1,52 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ [3]. В результате расчетов тепловой трубы получены следующие геометрические и тепловые параметры:

1. Теплоноситель – R600;
2. Материал корпуса – медь;
3. Наружный диаметр корпуса – 19,7 мм;
4. Внутренний диаметр корпуса – 16,6 мм;
5. Толщина торцевой крышки – 1,52 мм;
6. Длина тепловой трубы – 800 мм;
7. Количество, передаваемой теплоты одной тепловой трубой – 45 Вт.

Использование тепловой трубы в низкотемпературных установках возможно в качестве оригинального вертикально-трубного испарителя из тепловых труб, который положен в основу конструкции аккумулятора холода. [7]

Данный теплообменный аппарат имеет свои особенности в протекании процессов тепло - и массообмена. На рис. 2 представлена расчетная схема теплообменной тепловой трубки аккумулятора холода.


$$\left. \begin{aligned} Fo &= \left(\frac{r_0}{c_a |t_X|} + \frac{c_g \rho_g t_g}{c_a \rho_a |t_X|} + 0.5 \right) \left(\left(1 + \frac{1}{Bi} \right)^2 \ln \frac{1}{1 - \frac{\delta'}{\delta''}} - \left(1 + \frac{1}{Bi} \right) \frac{\delta'}{\delta''} \right) - \frac{1}{2Bi^2} \left(\ln \frac{1}{1 - \frac{\delta'}{\delta''}} + \ln \left(Bi \frac{\delta'}{\delta''} + 1 \right) \right), \\ \alpha_\phi &= \alpha_\kappa \left(\frac{\Delta i}{0,24 \Delta t} - 1 \right), \\ Nu &= 0,023 \left(\frac{Gd(1-x)}{\mu} \right)^{0,8} \left(\frac{c\mu}{\lambda} \right)^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_{CT}} \right)^{0,14}, \\ \tau &= \frac{r_0 \rho_a \delta_a}{\Delta t} \left(\frac{1}{\alpha_x} + \frac{\delta_c}{\lambda_c} + \frac{0,5 \delta_a}{\lambda_a} \right) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

В условиях аккумуляции холода и намораживания льда на наружной поверхности теплообмена тепловой трубки система (6) в соответствии с расчетной схемой преобразуется к виду системы (7), определяющей режим намораживания льда и его оттайки для снятия замороженного льда с теплообменной поверхности [14]:

$$\left. \begin{aligned} q_{зам} &= c_в \cdot (t_{вн} - t_3) + r_в + c_л \cdot (t_3 - t_л), \\ q_{от} &= c_л \cdot (t_{от} - t_л) + r_в, \\ \tau_{зам} &= \frac{q_3 \cdot \rho_л}{t_3 + |t_0|} \cdot \left(\frac{\delta_л^2}{2 \cdot \lambda_л} + \frac{\delta_{см}}{\alpha_a} \right), \\ \tau_{от} &= \frac{q_{от} \cdot \rho_л}{t_{от} + |t_{сп}|} \cdot \left(\frac{\delta_{от}^2}{2 \cdot \lambda_в} + \frac{\delta_{см}}{\alpha_a} \right), \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

где $c_в$ - теплоемкость воды, $\text{кДж} / (\text{кг} \cdot \text{К})$; $c_л$ - теплоемкость льда, $\text{кДж} / (\text{кг} \cdot \text{К})$; $r_в$ - теплота льдообразования, $\text{кДж} / \text{кг}$; $t_{вн}$ - начальная температура льдообразования, $^{\circ}\text{C}$; $\rho_л$ - плотность льда, $\text{Кг} / \text{м}^3$; $\lambda_л$ - теплопроводность льда, $\text{Вт} / (\text{м} \cdot \text{К})$; $\lambda_в$ - теплопроводность воды, $\text{Вт} / (\text{м} \cdot \text{К})$; $\delta_{см}$ - толщина стенки трубки, м ; α_a - коэффициент теплоотдачи от хладагента, $\text{Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К})$; $\delta_{от}$ - толщина слоя воды при работе аккумулятора в режиме оттайки, м ; $q_{зам}$ - теплота замораживания слоя льда, Вт ; $q_{от}$ - теплота оттаивания слоя льда, Вт ; $\tau_{зам}$ - время замораживания слоя льда, с ; $\tau_{от}$ - время оттаивания слоя льда при очистке поверхности аккумуляции, с .

Решение системы уравнение (7) определяет следующие параметры работы элемента из тепловой трубы: коэффициент теплоотдачи от хладагента к стенке теплового трубе, α , $\text{Вт} / \text{м}^2 \cdot \text{К}$; плотность теплового потока при аккумуляции холода, q_F , $\text{Вт} / \text{м}^2$ [18, 19].

Обсуждение результатов. В зоне конденсации элемента тепловой трубы развивается пленочный режим течения, который является функцией критерия Рейнольдса, при этом с увеличением толщины пленки ламинарное течение пленки, имеющей гладкую поверхность, переходит в волновое, а затем становится турбулентным.

Кроме физических свойств жидкости хладагента в тепловой трубе на теплоотдачу влияет шероховатость стенки, ее положение в пространстве и размеры стенки; в частности, с увеличением шероховатости поверхности и высоты вертикальной стенки пленка конденсата утолщается книзу (рис. 3).

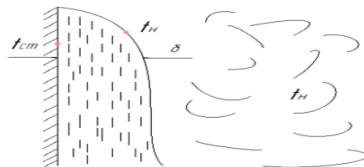


Рис. 3 - Схема формирования пленки конденсата

Fig. 3 - Condensate film formation scheme

Обобщенное уравнение для определения коэффициента теплоотдачи от конденсирующихся паров имеет вид:

$$Nu = f(Ga, Pr, K) \quad (8)$$

Причем на основе обработки опытных данных эту функцию можно представить уравнением:

$$Nu = f(Ga, Pr, K)^{0,25}, \quad (9)$$

где $K = \frac{r}{c_ж \Delta t}$ - критерий, характеризующий изменение агрегатного состояния, или критерий конденсации.

Входящие в (8, 9) критерии Ga и Pr отнесены к пленке конденсата. Выражение для критерия конденсации K можно определить путем подобного преобразования дифференциального уравнения, характеризующего граничные условия. Это уравнение получается приравниванием количества тепла, выделяющегося при конденсации пара на элементе поверхности dF стенки и отводимого через пленку конденсата посредством теплопроводности (по закону Фурье).

Критерии К следует рассматривать как меру отношения теплового потока, затрачиваемого на фазовое превращение, к теплоте перегрева или переохлаждения фазы при температуре ее насыщения.

При конденсации чистого насыщенного пара на поверхности вертикальной стенки тепловой трубы и ламинарного стекания пленки конденсата определяющим линейным размером является высота Н стенки зоны конденсации, при этом было получено уравнение для определения коэффициента теплоотдачи от конденсирующегося холодильного агента внутри тепловой трубы к ее стенке:

$$\alpha = 2,04A \left(\frac{r}{H\Delta t} \right)^{0,25}, \quad (10)$$

где $A = \sqrt[4]{\frac{\rho^2 \lambda_{ж}^3}{\mu_{ж}}}$ – составляет все физические константы конденсата при определяющей температуре, равной средней температуре пленки.

Результаты расчетов коэффициента теплоотдачи в тепловой трубе для различных видов холодильных агентов представлены на рис. 4 [20].

На основании проведенного анализа процессов теплообмена и расчетов конструктивных параметров и коэффициентов теплопередачи спроектирован опытный образец низкотемпературного рекуператора из теплообменных труб. Исследование истинных параметров и режимов работы опытного образца рекуператора предусмотрено в составе экспериментальной установки (рис. 5) [9, 13, 16].

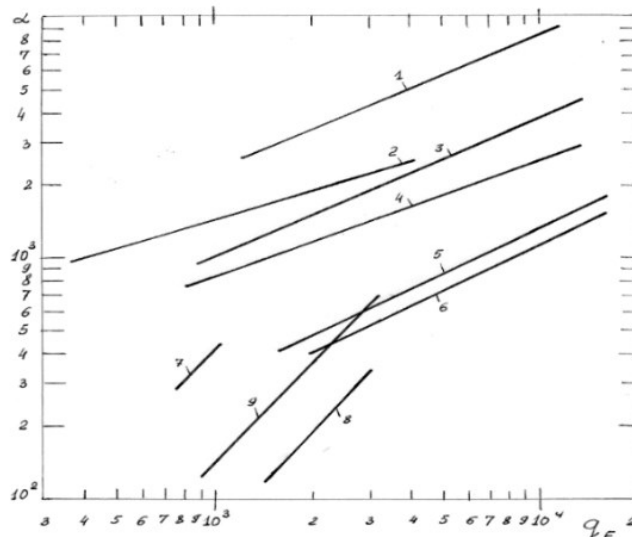


Рис. 4 - Зависимости коэффициента теплоотдачи α Вт/м²*град от плотности теплового потока q Вт/м² и температуры конденсации T_k в низкотемпературной тепловой трубе аккумулятора для некоторых хладагентов

- 1 - для аммиака R717 при $T_0 = 253-283$ К; 2 - для аммиака R717 при $T_0 = 243$ К;
 3 - для аммиака R717 при $T_0 = 258$ К; 4 - для аммиака R717 при $T_0 = 283$ К; 5 - для фреона R12 при $T_0 = 263$ К; 6 - для фреона R12 при $T_0 = 248$ К; 7 - для фреона R22 при $T_0 = 300$ К;
 8 - для фреона R22 при $T_0 = 313$ К; 9 - для фреона R134a при $T_0 = 307$ К.

Fig. 4 - Dependences of the heat transfer coefficient α W/m²*deg from the heat flux density q W/m² and the condensation temperature T_k in the low-temperature heat pipe of the battery for some refrigerants

- 1 - for ammonia R717 at $T_0 = 253-283$ К; 2 - for ammonia R717 at $T_0 = 243$ К;
 3 - for ammonia R717 at $T_0 = 258$ К; 4 - for ammonia R717 at $T_0 = 283$ К;
 5 - for freon R12 at $T_0 = 263$ К; 6 - for freon R12 at $T_0 = 248$ К; 7 - for freon R22 at $T_0 = 300$ К;
 8 - for freon R22 at $T_0 = 313$ К; 9 - for freon R134a at $T_0 = 307$ К.

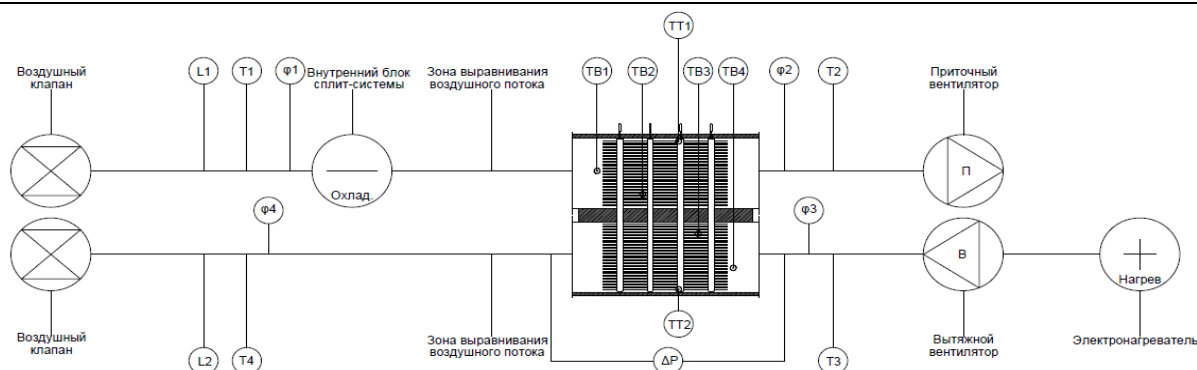


Рис. 5 - Функциональная и измерительная схема экспериментального стенда

Fig. 5 - Functional and measuring scheme of the experimental stand

Вывод. Дальнейшее проведение экспериментов с рекуператором из тепловых труб позволит обеспечить накопление экспериментальных данных. Статистические методы обработки и анализа дадут оптимальные параметры, размеры конструкции и режимы работы новых типов рекуператоров.

В результате экспериментального исследования планируется разработать методику проектного расчета для проектирования рекуператоров из тепловых труб для работы в составе низкотемпературной установки систем кондиционирования.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке Кубанского научного фонда в рамках научного проекта № Н-24.1/15.

Acknowledgments. The study was carried out with the financial support of the Kuban Science Foundation within the framework of scientific project No. H-24.1/15.

Библиографический список:

1. С. Чи Тепловые трубы. Теория и практика. – М.: Машиностроение, 1981г., 206 с.
2. Бажанов, А.Г. Интенсификация теплопередачи макетного образца двухпоточной тепловой трубы / А.Г. Бажанов, Д.А. Ремезов // Научный взгляд в будущее. – 2019. – Т. 1, № 15. – С. 21-27. – DOI 10.30888/2415-7538.2019-15-01-014.
3. Озонобезопасные альтернативы и заменители. Пропелленты, хладагенты, вспениватели, растворители, огнегасящие средства /В.Г. Барабанов, О.В. Блинова, В.С. Зотиков и др. – СПб.: Химиздат, 2003. – 304 с.
4. Бабакин Б.С. Хладагенты, масла, сервис холодильных систем: Монография. – Рязань: Узорочье, 2003. – 470 с.
5. Цветков О.Б. Холодильные агенты. – СПб.: СПбГУНиПТ, 2004. – 216 с.
6. Патент № 2660980 С2 Российская Федерация, МПК F28D 15/02. тепловая труба и способ ее работы: № 2016112286: заявл. 01.04.2016: опубл. 11.07.2018 / В.Д. Шкилев, А.П. Коржавый, К.С. Рыжков, В.А. Подгорбунский.
7. Патент РФ г. Москва, 10 октября 2002г., Холодильная установка с аккумулятором холода из тепловых труб, Шляховецкий В.М., Хамие Х.Н., Пат. № 2190813 Россия, МКИ6 С1 7 F 25 В 7/00, F 28 D 15/02 № 2001105728/06; Заявл.28.02.2001, опубл. 10.10.2002г., Бюл.№ 28.
8. Попов И.А. Промышленное применение интенсификации теплообмена — современное состояние проблемы: обзор // Теплоэнергетика. — 2020. — № 1. — С. 3–14.
9. Volodin V.V., Petrov A.A. Modern methods of heat transfer intensification in heat exchangers // High Temperature. — 2021. — Vol. 59, No. 2. — P. 210–222.
10. Ovsianik M.M. Modeling of heat transfer processes during liquid boiling: monograph. — Moscow: MEI Publishing House, 2020. — 200 p.
11. Petrov P. P. Prospects for the development of heat supply systems in municipal economy // Municipal Economy Journal. — 2020. — No. 3. — P. 12–18.
12. Ivanov D.S. Investigation of the efficiency of vortex apparatuses with twisted gas and liquid flows // Universe: Technical Sciences. — 2021. — No. 4(85). — P. 113–117.
13. Kuznetsov N.V. Experimental study of heat transfer in modern heat exchangers. *Energy Saving*. 2021;2: 34–39.
14. Sokolov G.G. Innovative methods of heat transfer intensification in heat exchange equipment // Industrial Heat Engineering. — 2020. — No. 5. — P. 56–63.
15. Orlov A.A. Analysis of the effectiveness of modern heat exchangers in industrial applications // Chemical Engineering Journal. — 2021. — Vol. 12, No. 3. — P. 78–85.
16. Smirnova E.E. Heat transfer processes in compact heat exchangers: experimental studies // Journal of Heat and Mass Transfer. — 2020. — Vol. 47, No. 6. — P. 1025–1033.

17. Расчет теплоутилизатора с использованием тепловых труб в системе утилизации тепла вытяжного воздуха / А.С. Зайцев, М.В. Шамаров, Р.А. Жлобо, Е.О. Ивченко // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2023. – Т. 50, № 4. – С. 17-25. – DOI 10.21822/2073-6185-2023-50-4-17-25.
18. Шамаров, М.В. Анализ теплопередачи в процессе замораживания и плавления на примере аккумулятора холода из тепловых труб / М.В. Шамаров, А.С. Зайцев // Механика, оборудование, материалы и технологии : Электронный сборник научных статей по материалам третьей международной научно-практической конференции, Краснодар, 29–30 октября 2020 года. – Краснодар: ООО «Принт Терра», 2020. – С. 981-982.
19. Шамаров, М.В. Моделирование аккумулятора холода на базе тепловых труб / М.В. Шамаров // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. – 2010. – № 1(313). – С. 80-81.
20. Соколов, Н.Ю. Математическое моделирование и оптимизация систем тепловых труб / Н.Ю. Соколов, В.А. Кулагин, Д.А. Нестеров // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. – 2021. – Т. 14, № 7. – С. 860-879. – DOI 10.17516/1999-494X-0352.

References:

1. S. Chi Heat pipes. Theory and practice. - M.: Mashinostroenie, 1981, 206 p.
2. Bazhanov, A.G. Intensification of heat transfer of a prototype of a two-flow heat pipe / A.G. Bazhanov, D.A. Remezov. *Scientific look into the future*. 2019;1(15):21-27. - DOI 10.30888/2415-7538.2019-15-01-014. (In Russ.)
3. Ozone-safe alternatives and substitutes. Propellants, refrigerants, foaming agents, solvents, fire extinguishing agents / V.G. Barabanov, O.V. Blinova, V.S. Zotikov et al. - SPb.: Khimizdat, 2003. 304 p. (In Russ.)
4. Babakin B.S. Coolants, oils, service of refrigeration systems: Monograph. Ryazan: Uzorochie, 2003. 470 p.
5. Tsvetkov O.B. Cooling agents. - SPb.: SPbGUNiPT, 2004. 216 p. (In Russ.)
6. Patent No. 2660980 C2 Russian Federation, IPC F28D 15/02. heat pipe and its operating method: No. 2016112286: declared. 01.04.2016: publ. 11.07.2018. V.D. Shkilev, A.P. Korzhavy, K.S. Ryzhkov, V.A. Podgorbunsky. (In Russ.)
7. Patent of the Russian Federation, Moscow, October 10, 2002, Refrigeration unit with a cold accumulator made of heat pipes, Shlyakhovetsky V.M., Hamie H.N., Patent. No. 2190813 Russia, MKI6 C1 7 F 25 B 7/00, F 28 D 15/02 No. 2001105728/06; Cl. 28.02.2001, published. 10.10.2002, Bulletin No. 28. (In Russ.)
8. Popov I.A. Industrial application of heat transfer intensification — current state of the problem: review. *Thermal Power Engineering*. 2020; 1: 3–14. ResearchGate(In Russ.)
9. Volodin V.V., Petrov A.A. Modern methods of heat transfer intensification in heat exchangers. *High Temperature*. 2021;59(2): 210–222.
10. Ovsianik M.M. Modeling of heat transfer processes during liquid boiling: monograph. — Moscow: MEI Publishing House, 2020. 200 p.
11. Petrov P. P. Prospects for the development of heat supply systems in municipal economy. *Municipal Economy Journal*. 2020; 3: 12–18.
12. Ivanov D. S. Investigation of the efficiency of vortex apparatuses with twisted gas and liquid flows. *Univer-sum: Technical Sciences*. 2021; 4(85):113–117.
13. Kuznetsov N.V. Experimental study of heat transfer in modern heat exchangers. *Energy Saving*. 2021;2: 34–39.
14. Sokolov G.G. Innovative methods of heat transfer intensification in heat exchange equipment. *Industrial Heat Engineering*. 2020; 5:56–63.
15. Orlov A.A. Analysis of the effectiveness of modern heat exchangers in industrial applications. *Chemical Engineering Journal*. 2021; 12(3):78–85.
16. Smirnova E.E. Heat transfer processes in compact heat exchangers: experimental studies. *Journal of Heat and Mass Transfer*. 2020; 47(6): 1025–1033.
17. Calculation of a heat recovery unit using heat pipes in the exhaust air heat recovery system / A.S. Zaitsev, M.V. Shamarov, R.A. Zhlobo, E.O. Ivchenko. *Herald of the Dagestan State Technical University. Technical sciences*. 2023; 50(4): 17–25. – DOI 10.21822/2073-6185-2023-50-4-17-25. (In Russ.)
18. Shamarov, M.V. Analysis of heat transfer during freezing and melting using a heat pipe cold accumulator as an example / M.V. Shamarov, A.S. Zaitsev // Mechanics, equipment, materials and technologies: Electronic collection of scientific articles based on the materials of the third international scientific and practical conference, Krasnodar, October 29–30, 2020. - Krasnodar: Print Terra LLC, 2020; 981-982. (In Russ.)
19. Shamarov, M.V. Modeling of a heat pipe cold accumulator / M.V. Shamarov. *News of higher educational institutions. Food technology*. 2010;1 (313):80-81. (In Russ.)
20. N.Yu. Sokolov, V.A. Kulagin, D.A. Nesterov. Mathematical modeling and optimization of heat pipe systems / N.Yu. Sokolov, V.A. Kulagin, D.A. Nesterov. *Journal of the Siberian Federal University. Series: Engineering and Technology*. 2021;14(7): 860-879. - DOI 10.17516/1999-494X-0352. (In Russ.)

Сведения об авторах:

Алексей Владимирович Колинко, лаборант-исследователь, кафедра технологического оборудования и систем жизнеобеспечения; alx.kol@yandex.ru

Максим Владимирович Шамаров, кандидат технических наук, доцент, доцент; schmax@mail.ru; ORCID 0000-0001-7520-8621

Александр Олегович Галанин, лаборант-исследователь, кафедра технологического оборудования и систем жизнеобеспечения; ol.galanin5050@gmail.com

Ирина Ивановна Юрченко, лаборант-исследователь, кафедра технологического оборудования и систем жизнеобеспечения; Ymlgel@mail.ru

Руслан Андреевич Жлобо, старший преподаватель, кафедра технологического оборудования и систем жизнеобеспечения; rzhlobo@bk.ru; ORCID 0000-0003-2568-2872

Артём Сергеевич Зайцев, аспирант, кафедра технологического оборудования и систем жизнеобеспечения; tanketka.2013@mail.ru

Information about authors:

Alexey V. Kolinko, Laboratory Research Assistant, Department of Technological Equipment and Life Support Systems; alx.kol@yandex.ru

Maksim V. Shamarov, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Assoc. Prof., Department of Technological Equipment and Life Support Systems; schmax@mail.ru; ORCID 0000-0001-7520-8621

Alexander O. Galanin, Laboratory Research Assistant, Department of Technological Equipment and Life Support Systems; ol.galanin5050@gmail.com

Irina I. Yurchenko, Laboratory Research Assistant, Department of Technological Equipment and Life Support Systems; Ymlgel@mail.ru

Ruslan A. Zhlobo, Senior lecturer, Laboratory Research Assistant, Department of Technological Equipment and Life Support Systems; rzhlobo@bk.ru; ORCID 0000-0003-2568-2872

Artem S. Zaitsev, Postgraduate Student, Department of Technological Equipment and Life Support Systems; tanketka.2013@mail.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 20.12.2024.

Одобрена после рецензирования/ Revised 17.01.2025.

Принята в печать/Accepted for publication 15.04.2025.

Конструктивные особенности реактора генератора-абсорбера гелиоэнергетических холодильных установок

М.Ф. Руденко, Ю.В. Шипулина, В.Н. Саинова, Е.В. Андреева

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

Резюме. Целью исследования является определение конструктивных особенностей основной части генератора-абсорбера гелиоэнергетических холодильных установок абсорбционного типа реактора – устройства, где находится насыщенный хладоном сорбент, и в котором при нагреве и охлаждении протекают термохимические реакции десорбции и абсорбции. Исследование проводится для выявления принципов рационального устройства, реализующего эффективность действия и максимальную возможность использования физико-химических свойств рабочих пар (сорбента и хладагента). **Метод.** Анализируется динамика развития одного из основных элементов аппарата гелиоэнергетических холодильных установок - реактора генератора-абсорбера, работающего на твердых сорбентах и озонобезопасных хладагентах. **Результат.** Рассмотрены разработанные конструкции реакторов, применяемых в гелиоэнергетических холодильных установках; выявлены достоинства и недостатки, механизмы взаимодействия и регулирования внутренних процессов в термохимическом компрессоре; определены перспективы развития новых сорбентов и хладагентов для инновационных моделей, пути повышения эффективности работы реакторов и перспективы развития на их основе гелиоэнергетических холодильных установок и агрегатов. Отмечаются особенности применения технических решений, лежащих в основе работы схемных устройств, повышающих эффективность работы как генератора-абсорбера, так и всей гелиоэнергетической холодильной установки. **Вывод.** На повышение производительности работы гелиоэнергетической холодильной установки оказывает влияние группа факторов: механизм регулирования механических деформаций рабочего сорбента в реакторе; разработка и внедрение новых сорбентов и поиск эффективных рабочих пар; применение нанесенных селективных покрытий на наружную поверхность реактора, обогреваемого солнцем; рациональное фокусирование солнечной энергии на нагревательные элементы реактора днем; возможность создания эффективных условий для охлаждения всей поверхности реактора ночью. Найти компромиссное конструктивное решение в противоречивых задачах, сопровождающих процессы в реакторе, является основной задачей разработчиков подобных гелиоэнергетических термотрансформаторов для холодильников, кондиционеров, генераторов пищевого льда и т.п.

Ключевые слова: реактор, гелиоэнергетический холодильник, сорбенты, хладагенты

Для цитирования: М.Ф. Руденко, Ю.В. Шипулина, В.Н. Саинова, Е.В. Андреева. Конструктивные особенности реактора генератора-абсорбера гелиоэнергетических холодильных установок. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025; 52(2):52-62. DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-2-52-62

Design features of the generator-absorber reactor of solar power refrigeration plants

M.F. Rudenko, Y.V. Shipulina, V.N. Sainova, E.V. Andreeva

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

Abstract. Objective. The aim of the study is to determine the design features of the main part of the generator-absorber of solar power refrigeration units of the absorption type reactor - a device where the sorbent saturated with freon is located, and in which thermochemical reactions of desorption and absorption occur during heating and cooling. The study is carried out to identify the principles of a rational device that implements the efficiency of action and the maximum possibility of using the physicochemical properties of the sorbent and refrigerant. **Method.** The dynamics of the generator-absorber reactor development operating on solid sorbents and ozone-safe refrigerants is analyzed. **Result.** The designs of reactors used in solar power refrigeration units are considered; advantages and disadvantages, mechanisms of interaction and regulation of internal processes in the thermochemical compressor are identified; prospects for the development of new sorbents and refrigerants, ways to improve the efficiency of reactors and prospects for the development of solar power refrigeration units and units are determined. The article notes the features of application of technical solutions increasing the efficiency of the generator-absorber and solar power refrigeration plant. **Conclusion.** The increase in the performance of the solar power refrigeration plant is influenced by the following factors: mechanism for regulating mechanical deformations of the working sorbent in the reactor; introduction of new sorbents and search for effective working pairs; application of selective coatings on the outer surface of the reactor heated by the sun; rational focusing of solar energy on the heating elements of the reactor during the day; creation of effective conditions for cooling the reactor surface at night. A compromise design solution is the main task of developers of such solar power thermal transformers for refrigerators, air conditioners, food ice generators, etc.

Keywords: reactor, solar power refrigeration plant, sorbents, refrigerants

For citation: M.F. Rudenko, Y.V. Shipulina, V.N. Sainova, E.V. Andreeva. Design features of the generator-absorber reactor of solar power refrigeration plants. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2025;52(2):52-62. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-2-52-62

Введение. Внедрение гелиоэнергетических холодильных установок в народное хозяйство в системы кондиционирования, производство пищевого льда, бытовых холодильников там, где климатические условия позволяют это делать, выгодно по следующим причинам: во-первых, автономная работа осуществляется за счет потребления возобновляемой солнечной энергии, поэтому происходит энергосбережение традиционных источников из водородно-углеродного топлива; во-вторых, улучшается экология окружающей среды, так как нет выбросов от парниковых и углекислых газов в атмосферу от производства электрической энергии на ТЭС (тепловых электрических станциях) - чистота атмосферы; в третьих, применение озонобезопасных хладагентов и химически безопасных сорбентов в качестве рабочих пар установок снижает токсикологические нагрузки на окружающую среду [1-3]. Такие установки при получении теплоты и холода могут не потреблять электрическую энергию вообще, а работа их осуществляется в циклическом режиме. Днем идет накопление хладагента (режим регенерации), ночью получают теплоту в абсорбере и холод в испарителе (режим генерации) [4-6].

На рис. 1 изображена схема типовой конструкции современной гелиоэнергетической установки. Под реактором гелиоэнергетического холодильника будем понимать часть элемента конструкции генератора-абсорбера, в котором находится насыщенный хладагентом сорбент. В данной конструкции генератор-абсорбер выполнен из двух изолированных обогреваемых солнцем гелиоприемников (емкостей) типа «горячий ящик», с двустекольным покрытием в виде вакуумного стеклопакета, внутри которого установлены плоские зеркальные отражатели, концентрирующие солнечные лучи на цилиндрическую горизонтально расположенную поверхность реактора.

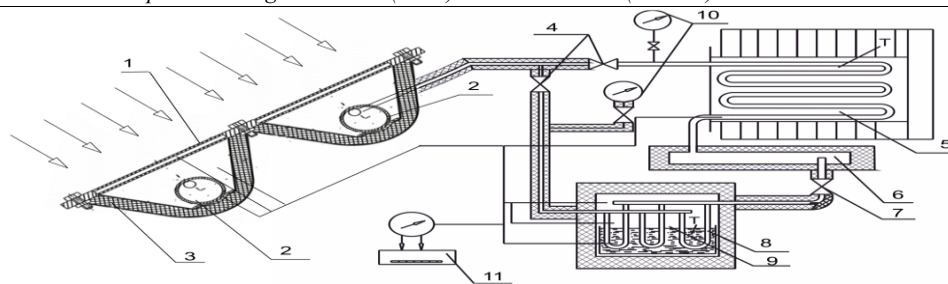


Рис. 1 - Типовая схема конструкции гелиоэнергетической установки (холодильник для бытовых целей): 1 – генератор-абсорбер; 2 – реакторы 3 – гелиоприемное устройство, 4 – вентили 3 – изоляция, 5 конденсатор, 6 – ресивер, 7 – регулирующий вентиль, 8 – испаритель, 9 – охлаждаемая камера, 10 – матометры, 11 – измеритель температур

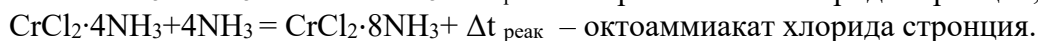
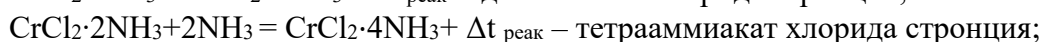
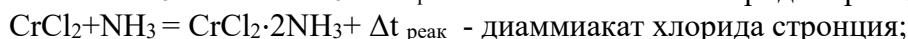
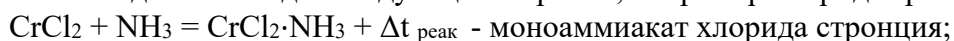
Fig. 1 - Typical design diagram of a solar power plant (a refrigerator for domestic purposes):

1 – generator-absorber; 2 – reactors 3 – solar receiving device, 4 – valves 3 – insulation, 5 – condenser, 6 – receiver, 7 – control valve, 8 – evaporator, 9 – cooled chamber, 10 – matometers, 11 – temperature meter

Постановка задачи. Повышение эффективности работы термохимического компрессора за счет совершенствования конструктивной части реактора генератора-абсорбера является важным условием в улучшении преобразования энергии солнечной радиации и эффективного использования суточных перепадов давлений в дневное и ночное время в аппаратах гелиоэнергетических холодильных установок.

Методы исследования. В основе работы термохимического компрессора лежат химические процессы, связанные со структурой изменения химического состава вещества – сорбента и абсорбата (хладагента) при протекании абсорбции с отводом теплоты и обратным процессом десорбции при подводе к насыщенному сорбенту теплоты. Веществами сорбентами могут быть щелочно-земельные соли: такие как хлорид кальция, хлорид стронция, хлорид бария и другие [7], в качестве абсорбента – аммиак.

Почему именно на эти вещества впервые обратили внимание исследователи? Точного объяснения причины пока нет, но обращает внимание то, что эти соли в атомах на последних орбитах имеют по восемь свободных электронов, и к ним при определенных энергетических ситуациях могут присоединяться биполярные молекулы аммиака, образуя ступенчато при определенных температурах ди-, тетра-, окто- аммиакаты. При увеличении энергии молекул происходит обратный процесс ступенчатого распада молекул в обратной последовательности до чистого состава соли. Термохимическая реакция щелочноземельных солей с хладагентом идет следующим образом, например хлорид стронция-аммиак:



При процессах абсорбции связанных с поглощением сорбентом хладагента происходят и объемные изменения аммиакатов, объем которых увеличивается в 2 -3 раза по сравнению с чистой солью. В табл.1 и 2 представлены сравнительные характеристики, наиболее часто встречающихся в холодильных устройствах рабочих пар, по которым можно дать беглую оценку их применения. Основные физико-химические параметры чистых щелочноземельных сорбентов и их аммиакатов, а также с металлическими примесями (обобщенные данные) приводятся в литературе [7]. Реакторы первых сорбционных холодильных установок изготавливались плоскими пластинчатыми или кожухотрубными цилиндрическими с трубками наружного оребрения между которыми засыпался сорбент. При многократной циклической работе, проходила деформация пластин и ребер, что в конечном счете при нескольких лет эксплуатации приводило их к поломкам и выводам реакторов из эксплуатации. Это были установки периодического действия и работали они от нагрева при сжигании дров, угля или электроэнергии [4].

Таблица 1. Обобщенные характеристики различных аммиаков

Table 1. General characteristics of various ammonias

Теплофизические характеристики Thermophysical Characteristics	$SrCl_2 \cdot 1NH_3$	$SrCl_2 \cdot 8NH_3$	$CaCl_2 \cdot 2NH_3$	$CaCl_2 \cdot 8NH_3$
Эффективный коэффициент температуропроводности, $a, 10^4 \text{ м}^2/\text{с}$ Effective thermal diffusivity	0,12÷0,14	0,06÷0,07	0,13÷0,14	0,06÷0,07
Эффективный коэффициент теплопроводности, $\lambda, \text{Вт/м}^2\text{К}$ Effective thermal conductivity	0,05÷0,08	0,04÷0,05	0,05÷0,08	0,07÷0,08
Объемная теплоемкость, $C_v(p_c) \text{ кДж/м}^3\text{К}$ Volumetric heat capacity	339÷426	920÷1254	395÷505	942÷1420
Коэффициент теплопередачи, $k, \text{Вт/м}^2\text{К}$ Heat transfer coefficient	10÷90	10÷40	60÷140	20
Удельная плотность, Specific density $\rho, \text{кг/м}^3$	380÷400	510÷540	280	450÷530
Пористость, ψ Porosity	0,83÷0,84	0,59÷0,61	0,82	0,52÷0,59

Таблица 2. Обобщенные данные для рабочей пары $SrCl_2/NH_3$ с металлическими примесями

Table 2. Generalized data for the working pair $SrCl_2/NH_3$ with metallic impurities

Характеристики Characteristics	$SrCl_2 \cdot 1NH_3$	$SrCl_2 \cdot 8NH_3$
Эффективная температуропроводность, $a, 10^4 \text{ м}^2/\text{с}$ Effective thermal diffusivity	0,73	0,29
Эффективная теплопроводность, $l, \text{Вт/м}^2\text{К}$ Effective thermal conductivity	0,12	0,17
Теплоемкость, $C_p, \text{кДж/кг}^2\text{К}$ Heat capacity	167,0	563,5
Коэффициент теплопередачи, $k, \text{Вт/м}^2\text{К}$ Heat transfer coefficient	10-20	10-30

С привлечением к работе энергии солнечной радиации изменились и конструкции реакторов гелиоэнергетических установок. Развитие гелиоприемников холодильных установок пошло по двум направлениям: использование параболических концентраторов в фокусирующей части которых устанавливается трубчатая конструкция реактора, обогреваемая днем солнцем или трубчатая коллекторная конструкция, устанавливаемая вертикально в «горячий ящик», который наклонен под углом широты местности к горизонту и остекленной стороной направленный на южную сторону, через которую солнечная радиация освещает реакторы. Вертикальное расположение труб реактора позволяло располагать сорбент в нижней части конструкции. При расширении сорбента (образовании аммиаков) соль перемещалась в верхнюю часть реактора. В верхней части обычно располагался и хладопровод, отводящий пары хладанента из генератора в конденсатор.

Конструкция реактора простая, однако из-за неравномерного нагрева или охлаждения поверхности реактора, плохой теплопроводности соли во всем объеме по высоте реактора образовывались пустоты, приводящие к выходу части сорбента из работы аппарата. Решить задачу полного наполнения реактора сорбентом, улучшив его эксплуатационные качества удалось ученым [8]. Конструкторы вставили в трубчатый реактор поршень (рис. 2). Перемещаясь по перфорированному хладопроводу внутри реактора поршень подпрессовывал сорбент, компенсируя химические расширения аммиаков механическими усилиями расширяющейся пружины. Пружина прикреплена к внутренней части корпуса реактора генератора-абсорбера.

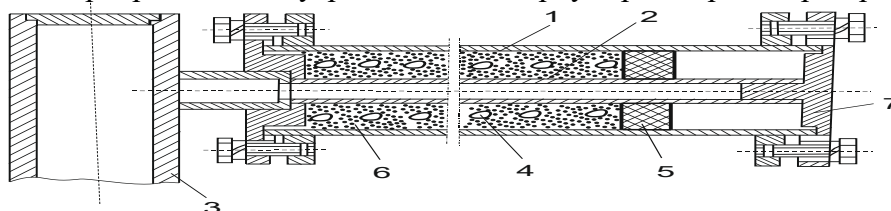


Рис. 2 – Схема конструкции реактора генератора-абсорбера с подвижным поршнем и пружиной, работающей на расширение: 1 – корпус реактора; 2 – трубка перфорированная 3 – трубка для отвода - подвода хладагента к реактору; 4 – пружина в сорбенте; 5 – поршень; 6 – сорбент; 7 – крышка реактора

Fig. 2 – Schematic diagram of the design of the reactor-absorber with a movable piston and a spring operating on expansion: 1 – reactor body; 2 – perforated tube 3 – tube for the removal - supply of coolant to the reactor; 4 – spring in the sorbent; 5 – piston; 6 – sorbent; 7 – reactor cover

Находясь в середине объема сорбента и работая на расширение, пружина разрыхляла его и не давала слеживаться. В данной конструкции реактора используется эффект и энергия растяжения круглой пружины. При абсорбции сорбент расширяется и пружина растягивается, часть полезного пространства в реакторе не работает из-за внутреннего расположения поршня, что увеличивает удельные массогабаритные характеристики конструкции реактора и уменьшает количество сорбента. Поршень под воздействием пружины постоянно осуществлял подпрессовку и рыхление аммиаков сорбента, что улучшает равномерность его распределения в реакторе, ликвидируются возможные пустоты и полости, создается равномерность подвода и отвода тепловых потоков к сорбенту. Недостатком такой конструкции является то, что пружина работает на растяжение. К подобному действию могут привести конструкции реакторов, выполненных по схеме (рис. 3).

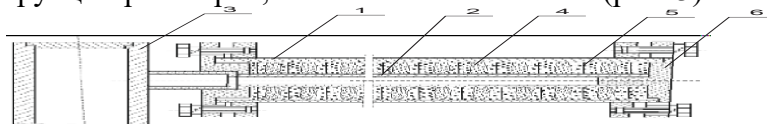


Рис. 3 – Схема конструкции реактора с сетчатыми проставками и подвижными шайбами:
 1 – корпус реактора, 2 – хладопровод, 3 – трубка для подвода хладагента, 4 – сетчатые шайбы,
 5 – плоские шайбы, 6 – крышка разъемная

Fig. 3 – Diagram of the reactor design with mesh spacers and movable washers: 1 – reactor body,
 2 – coolant pipe, 3 – coolant supply tube, 4 – mesh washers, 5 – flat washers, 6 – detachable cover

Сорбент в виде порошка соли засыпается в реактор частями, отделяясь между порциями сетчатой проставкой, выполненной из сетки или накрученной стальной проволоки и вертикальными плоскими шайбами с горизонтальными насечками. Сетка хорошо проводит тепло к сорбенту и деформируясь, компенсирует объемные изменения аммиаков, а шайбы компенсируют перемещения и удерживают сорбент от гравитационного сползания. Применение сеток из материалов с высокой теплопроводностью и хорошими антикоррозионными свойствами значительно повышает эффективность работы таких реакторов. Исследователи в работе [9] предложили на гладкий перфорированный хладопровод с отверстиями насадить лепестковые пластины с горизонтальными насечками, между которыми располагался насыщенный сорбент. Пластины зажимались пружиной, работающей на сжатие, образуя подвижной блок пластин (рис. 4). Количество пластин в блоке может составлять от 10 до 20 штук одинаковой конструкции, но различной модификации в зависимости от внутренней конструкции самого корпуса реактора.

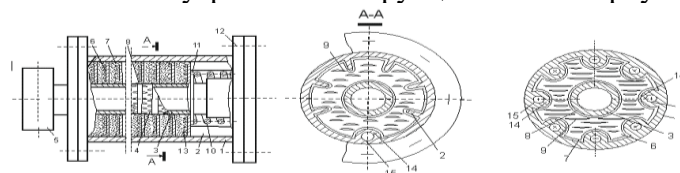


Рис. 4 - Схема конструкции реактора с внутренними подвижными ребрами
различной модификации

Fig. 4 - Diagram of the design of a reactor with internal movable ribs of various modifications

Виды пластин: 1- корпус цилиндрический, 2 – ребро продольное, 3 – трубка перфорированная, 4 – отверстие овальное, 5 – хладопровод, 6 – пластины подвижные лепестково-образные, 7 – буртики срезные внутренние, 8 – буртики срезные наружные, 9 – насечки горизонтальные, 10 – пружина винтовая, 11 – шайба подвижная, 12 – фланец корпуса, 13 – абсорбент, 14 – большое продольное ребро, 15 – отверстие для отвода тепла абсорбции.

Развитые горизонтальные насечки позволяют удерживать сорбент на пластинах, не давая сползать аммиакатам вниз под действием гравитационных сил, вертикальные пластины улучшают теплопроводность полного объема сорбента, перфорированный хладопровод, расположенный в центральной части конструкции реактора осуществляет равномерный подвод и отвод хладагента к полному объему сорбента, пружина сглаживает продольные деформации объемных изменений аммиаков. Заостренные заусены позволяют удерживать сорбент на внешних краях пластин и не дают слеживаться сорбенту.

Острые заусенцы пластин на внутренней и наружной части, перемещаясь в реакторе по наружной поверхности хладопровода срезают влажные слои аммиаков сорбента, не давая им слеживаться и очищают поверхности скольжения от сорбента. Длина горизонтальных заусенцев регулирует горизонтальные габариты всей конструкции перемещения и фиксирует подвижность общей конструкции пакета пластин. Лепестковообразные пластины могут быть различной модификации (две пластины представлены на рис. 4). Более сложная конструкция корпуса реактора с внутренним оребрением позволяет в оребрении делать каналы для движения теплоносителя, который можно нагревать днем от избытком энергии солнечной радиации, а ночью от теплотой абсорбции.

В такой конструкции используется эффект и энергия сжимаемой круглой пружины в отличие от растяжения время продолжительности работоспособности такого реактора значительно увеличивается, улучшаются, эксплуатационные характеристики и безотказность работы. В некоторых работах [10] был исследован гранулированный сорбент, который показал эффективность работы реактора гелиоэнергетического холодильника за счет большей и лучшей поверхности контакта при взаимодействии сорбента и хладагента.

Недостатком гранул является недолгий период взаимодействия и быстрое разрушение целостности гранул сорбента. Поэтому необходима оболочка сохраняющая значительное время сорбент в малом объеме, таком как гранулы. Учеными [11] была предложена конструкция реактора из капсул с армированными сетками цилиндрической формы, уложенной рядами в корпус реактора (рис.5). При такой конструкции используется эффект подпружиниваемой деформации сеток капсул, изменяя расстояние и зазоры между капсулами.

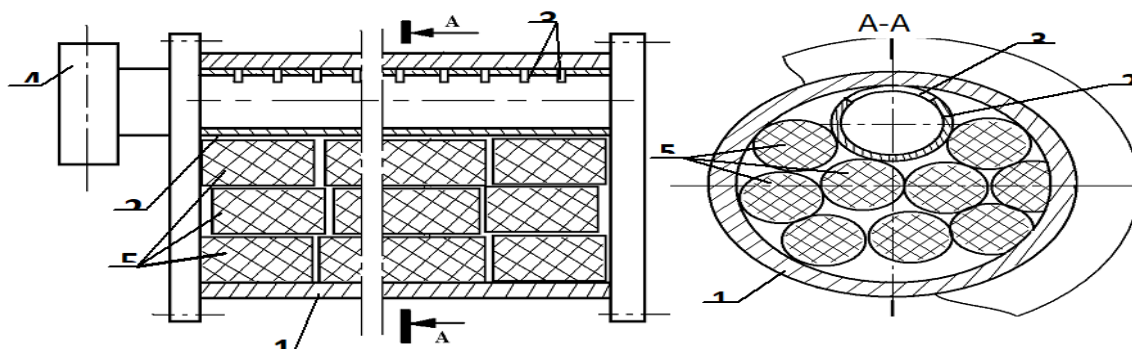


Рис. 5 – Схема реактора с цилиндрическими сетчатыми капсулами октоаммиаката соли сорбента в цилиндрическом реакторе: 1 – корпус цилиндрический; 2 – внутренняя перфорированная трубка; 3 – дугообразные щелевые отверстия; 4 – хладопровод; 5 – капсулы аммиаката соли
Fig. 5 – Scheme of the reactor with cylindrical mesh capsules of octoammine salt sorbent in a cylindrical reactor: 1 – Cylindrical body; 2 – Inner perforated tube; 3 – arc-shaped slotted holes; 4 – coolant; 5 – ammine salt capsules

Наличие армированной сетки улучшает не только объемную поверхность контакта к сорбенту но и теплопроводность его. Хладопровод, расположенный в верхней части реактора вдоль всего корпуса щелевыми отверстиями, вниз предохраняется от попадания сорбента соли в него и создает равномерное пространство для отвода и подвода хладагента к сорбенту. Рабочий объем реактора заполнен полностью. Этим достигается эффективность работы реактора. Другим способом использования армированных конструкций является применение энергии скручивающего сжатия плоской ленточной пружины, закрученной по спирали Архимеда (рис.6). Пружина вместе с армированной сеткой скручивается в спираль и как пружина компенсирует деформации перемещения при сжатии и расширении сорбента. Возможно, изготовить пружину из металлов со свойствами запоминания формы [12].

В настоящее время рядом иностранных фирм и некоторыми российскими научно-производственными институтами разрабатываются новые сорбенты на основе передовых

нанотехнологий, которые не только обладают хорошими абсорбирующими свойствами, но и имеют небольшие объемные расширения по сравнению с щелочноземельными солями.

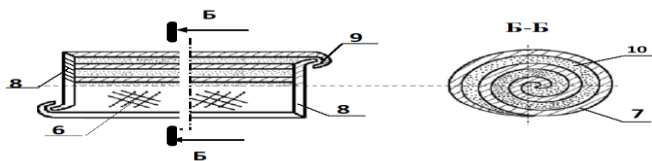


Рис. 6 – Схема реактора с армированной сеткой:

8 – армированная сетка, 9 – замок на сетке, 7 – пружина в форме спирали Архимеда,
8 – стенка сетки, слой армированного сеткой сорбента

Fig. 6 – Reactor diagram with reinforced mesh: 8 – reinforced mesh, 9 – mesh lock,
7 – Archimedes spiral spring, 8 – mesh wall, mesh-reinforced sorbent layer

Разработан новый сорбент – кремнезем модифицированный нитратом кальция. Изготавливаются гибридные и комбинированные соединения в форме матриц из активированных углей или вермикулита с включением в структуру сухих солей, исследуются различные графитометаллические добавки в сухих солях для улучшения пористости структуры соли и ее теплофизических свойств (теплопроводности, теплоемкости, абсорбционной способности, влагоотталкиванию и т.д.), что приводит к увеличению сроков эксплуатации сорбента и увеличивает количество циклов работы термотрансформаторов.

Особое значение в работе реакторов имеет применение селективных покрытий [13]. Селективные покрытия наружного корпуса реактора днем максимально поглощают практически все частоты энергии солнечной радиации, а отражают лишь часть составляющей энергии от всего диапазона, таким образом, доводя энергию поглощения до 98,8 %. В ночное время такие поверхности при охлаждении при определенных температурных режимах максимально отдают во внешнюю среду частоту инфракрасного теплового излучения. Селективные покрытия светопропускающей части конструкции генератора-абсорбера пропускают весь спектр солнечного излучения в «горячий ящик» на корпус реактора и не выпускает обратно инфракрасную составляющую. Это тоже увеличивает производительность термотрансформаторов, на 5-6 % даже в пасмурные дни.

Для улучшения эффективности работы реакторов и термотрансформатора в целом изобретены новые синтетические силикагели и цеолитоподобные алюмофосфаты-сорбенты с уникальными специфическими свойствами. [14]. Активно внедряются в гелиоэнергетические установки смеси, состоящие из активированного угля и щелочноземельных солей в пропорции 1:4, рабочие пары на основе сорбентов силикагеля, цеолита и хладагента – воды, рассматриваются вопросы применения хладагента метанола, метиламина, этиламина, озонобезопасных фреонов и смесей [15, 16].

Обсуждение результатов. Данное исследование показало, что повышение производительности термотрансформаторов возможно за счет совершенствования конструкции реакторов. Достоинство гелиоэнергетических термотрансформаторов в том, что в них возможно не использовать электрическую энергию для получения тепла и холода вообще. Так, производство и серийный выпуск гелиоэнергетических холодильных установок во Франции поставлен на коммерческую основу. Там выпускают бытовые холодильники и генераторы пищевого льда, которые при эксплуатации в северной Африке продемонстрировали хорошие показатели. В РФ подобные гелиоэнергетические холодильные установки и агрегаты могут работать летом в Астраханской области, Калмыкии, в отдельных районах Дагестана и Кавказа, в Крыму, Хакасии и других регионах.

В работах [17, 18] представлены результаты проведенного исследования по влиянию внутреннего оребрения конструкции реактора на эффективность его работы.

Авторы разработали в пакете MatCAD графоаналитическую модель для проектирования реакторов гелиоэнергетических холодильных установок и агрегатов. На основании расчета температурных полей по наружным температурам цилиндрической

конструкции реактора и специфических элементов внутренней конструкции его методом расчета конечной разности температур рассчитываются и затем определяются градиенты тепловых потоков в сорбенте при режимах стационарных значений. Определяются тепловые поля с учетом особенностей внутренних конструкций аппаратов, таких как ребра, перфорированные хладопроводы, взаимное расположение их в реакторе.

Модель двумерная и при расчетах принимаются следующие допущения: сорбент по всей площади рассматривается как однородная среда; его материал имеет постоянную для всех температур теплопроводность, не учитываются естественные от всей его площади потери теплоты реактора, облучение солнечными лучами происходит при перпендикулярном расположении Солнца над поверхностью цилиндра конструкции реактора. Для численного расчета нестационарной теплопроводности использовалось нелинейное гармоническое уравнение теплопроводности Фурье. Уравнение в векторной форме представлено следующей формулой:

$$\rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} = \text{div}[\lambda \cdot \text{grad}(T)] \pm q^* \quad (1)$$

где q^* – удельный тепловой поток, подведенный или отведенный в процессе реакции. При подведении теплового потока реакция q^* берется со знаком «минус», при отведении – со знаком «плюс» (дополнительный подвод теплоты при реакции – десорбция; выделение теплоты при реакции адсорбция).

Адсорбция и десорбция хладагента (аммиака) происходит относительно хладопровода, расположенного в середине корпуса реактора. Между внешней стенкой реактора и хладопроводом засыпан сорбент. Температура на модели, соответствовала только углу при перпендикулярном освещении поверхности реактора солнечной энергией. Серия подобных моделей с различными параметрами внешнего облучения поверхности реактора солнцем при различных величинах температур окружающего воздуха позволяет воссоздать общую картину изменения тепловых процессов в реакторе генератора-адсорбера гелиоэнергетического термотрансформатора и делать соответствующий анализ об эффективности как реактора так и всей установки. Анализ разных конструктивных решений реактора позволил оптимизировать его геометрические параметры, улучшив эффективность его функционирования в сорбционной энергетической установке, и тем самым повысить коэффициент полезного действия всей установки.

Математическая модель позволяет отображать суточные изменения температуры и тепловых потоков в реакторе генератора-адсорбера при различных температурах его стенок, которые устанавливаются в зависимости от параметров окружающей среды, углов падения солнечных лучей, массы прогрева насыщенного сорбента. Модель позволяет оценить неравномерность прогрева насыщенного сорбента по температурным параметрам, введя коэффициент распределения тепловой энергии в реакторе:

$$\zeta = S_{t_{\text{дес}}} S_{t_{\text{наг}}} \quad (2)$$

где $S_{\text{дес}}$ - площадь теплоты с температурными параметрами равными температуре десорбции и выше, $S_{\text{наг}}$ - полная площадь прогрева сорбента, равная диаметру реактора, ζ - коэффициент показывает равномерность распределения тепловой энергии в реакторе генератора-адсорбера.

На этой основе можно моделировать и исследовать различные конструкции внутреннего оребрения реакторов. В качестве примера на рис. 7 представлены две модели реакторов в поперечном разрезе. Первая модель реактора простой конструкции с перфорированной хладоотводящей трубкой, расположенной в верхней части по оси симметрии и модель реактора с оребренной перфорированной трубкой хладоотвода, имеющего оребрения вдоль всей длины корпуса реактора. Из рис.7 видно, что применение внутреннего оребрения способно распределять в слое сорбента равномерно по всему объему. Увеличивается глубина прогрева сорбента и значения температурных градиентов, масса сорбента хорошо прогревается, снижается процент неиспользованного рабочего вещества. Если предположить, что облучение

солнечными лучами внешней оболочки корпуса будет одинаковым, то коэффициент $\zeta_{\text{прост}}=0,52$, а $\zeta_{\text{оребр}}=0,81$.

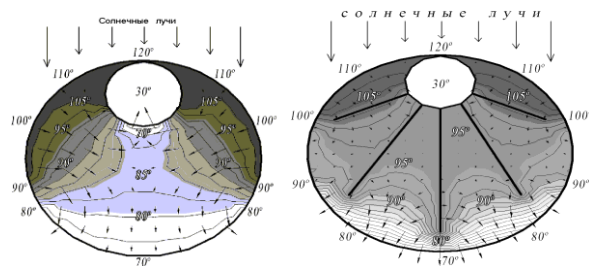


Рис. 7 – Распределение тепловых потоков от солнечной радиации в реакторе простой и сложной конструкции с внутренним оребрением

Fig. 7 – Distribution of heat flows from solar radiation in a reactor of simple and complex design with internal finning

Применение внутреннего оребрения хладагтовода в реакторе позволит до 30% улучшить распределение тепловой энергии в реакторе. По данным исследования математической модели разработаны перспективные конструкции реакторов [17]. Такие конструкции позволят облегчить заправку реактора аммиаком, повысят теплопроводность адсорбента, снизят нежелательные эффекты в реакторах при реакциях адсорбции и десорбции, улучшив тем самым теплофизические параметры реакторов.

Вывод. Повысить эффективность работы гелиоэнергетического термотрансформатора можно за счет разработок новых конструкций реакторов, некоторые схемы которых рассмотрены были в статье. В основе работы улучшающих рабочие характеристики сорбента в реакторе лежат процессы: подпрессовка сорбента, увеличение теплопроводности, увеличение площади контакта сорбента с хладагентом, разрыхление и снижение слеживания сорбента, образование компактного объема. Определенное место в повышении эффективности работы реактора занимает его покрытие специальным селективным слоем, способным в дневное световое время хорошо поглощать энергию солнечной радиации в широком диапазоне оптических частот, а в ночное время хорошо излучать тепловую энергию в окружающее пространство. Такие покрытия были разработаны в АГТУ и успешно применялись в испытаниях новых реакторов, повышая эффективность работы на 3-5 %.

Авторы надеются, что данная работа вызовет интерес не только у конструкторов, разработчиков и ученых по созданию гелиоэнергетической холодильной техники, но и у специалистов, которые могут изготавливать подобные установки (холодильники, охладители воды, льдогенераторы). Возможно, многие обогатят своими идеями и инновационными решениями конструкции этого важного аппарата гелиоэнергетической установки. Если конструкции бытовых холодильников, работающих на энергии солнечной радиации, в коммерческом варианте уже выпускают в Европе и они успешно работают в северной Африки, то эффективные кондиционеры ждут своей очереди.

Библиографический список:

1. Руденко, М.Ф. Гелиоэнергетические сорбционные термотрансформаторы для систем отопления и кондиционирования//М.Ф. Руденко, Ю.В. Шипулина, В.Н. Саинова А.А., Токарева Л.П., Третьяк Инженерно-строительный вестник Прикаспия 2022. № 1 (39) С.22-28.
2. Руденко, М.Ф. Обеспечение энергетической безопасности в условиях чрезвычайных ситуаций южных городов//М.Ф. Руденко, Ю.В. Шипулина, А.М. Руденко/Пожарная и техносферная безопасность и пути совершенствования: 2020, Вып.19(5). Донецк, ГОВПО, «Академия гражданской защиты» МЧС ДНР, 2020. С.517-521.
3. Brites, G.J.V.N. Influence of the design parameters on the overall performance of a solar adsorption refrigerator//G.J.V.N. Brites, J.J. Costa, V.A.F. Costa//Renewable Energy.- 2016. –Vol.86.- P. 238-250
4. М.Ф. Руденко, Ю.В. Шипулина В.Н. Саинова. Технические аспекты развития гелиоэнергетических холодильных установок на твердых сорбентах//Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023. Т.50 (3).-С.37-45

5. Шипулина, Ю.В., Моделирование и разработка конструкции генератора-адсорбера экологически безопасной гелиоэнергетической холодильной установки/ Ю.В. Шипулина, М.Ш. Каримов, М.Ф. Руденко//Химическое и нефтегазовое машиностроение 2013. № 2.-С.36-41
6. Руденко М.Ф., Чивиленко Ю.В., Антипов А.Е. Повышение энергетической эффективности экологически безопасных гелиохолодильных установок//Вестник международной академии холода. Санкт-Петербург – Москва. 2006. № 3. С.3-8
7. Руденко М.Ф., Шипулина Ю.В. Гелиоэнергетические термотрансформаторы «сухой» абсорбции циклического действия: монография. Астрахан.гос.техн.ун-т.-Астрахань:Изд-во АГТУ, 2013. 172 с.
8. А.С. СССР № 1983 Захидов Р.А., Шадиев С., Киргизбаев Д.А., Ачилов Б.М. Генератор-адсорбер гелиохолодильника.
9. Генератор-адсорбер гелиохолодильника: патент 2137991 РФ. № 98100862/06/Руденко М.Ф., Альземеньев А.В., Анихуви Жак Анри Джиджохе, Черкасов В.И., Макеев П.А.;заявл.05.01.98 ; опубл. 20.09.99, Бюл.№ 26. 4с.
10. Ачилов Б.М., Ч.Мангалжалав. Холодильная установка с твердым сорбентом // Холодильная техника № 2, 1990. С.5-7.
11. Реактор генератора-адсорбера гелиохолодильной установки (варианты): патент 2263859 Рос.Федерация. № 2003106499/06 / Руденко М.Ф., Ильин А.К., Коноплева Ю.В., Ильин Р.А., Заикин Е.Ю.; заявл.07.03.2003; опубл.10.11.2005, Бюл. № 31. 4с.
12. Лихачев В.А., Кузьмин С.Л., Каменцева З.П. Эффект памяти формы. Ленинградский государственный университет 1987 г. 218с.
13. Электролит для осаждения черных антикоррозионных оксидных покрытий на сталь: патент 2365676 РФ. № 2008130824/02 / Долецкая К.А., Кравцов Е.Е., Горская А.С., Мифтахова Г.Ф., Руденко М.Ф., Сурков М.И., Кириченко В.И., Шнбор М.И., Огородникова Н.П., Кондратенко Т.С.; заявл. 25.07.2008 ; опубл. 27.08.2009, Бюл.№ 24. 4с.
14. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102472>. K. Missaoui Heat storage in solar adsorption refrigeration systems: A case study for indigenous fruits preservation/Kolthoum Missaoui, Abdelhamid KheiriNader, FrikhaSlimane, GabssiMohammed El Ganaoui. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2022;40: 102472
15. Y.Yu, Q.W. Pan, L.W. Wang. A small-scale silicagel-water adsorption system for domestic air conditioning and water heating by the recovery of solar energy. *Frontiers in Energy*. 2020;14:328–336 <https://link.springer.com/article/10.1007/s11708-019-0623-1>
16. Mariella Mateo-Villanueva, Rodolfo Echarri D. Solar adsorption refrigeration system:Comparison between equilibrium, universal and transient model. Système frigorifique solaire à adsorption: Comparaison entre les modèles d'équilibre, universel et transitoire. *International Journal of Refrigeration*. 2024;157: 23-33
17. Каримов М.Ш., Руденко М.Ф., Шипулина Ю.В. Повышение эффективности адсорбционного гелиоэнергетического термотрансформатора//Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2016. № 3. С.31-35.
18. Методика определения тепловых нагрузок на реактор генератора- адсорбера гелиоэнергетической холодильной установки /Ю.В. Шипулина, М.Ш. Каримов, М.Ф. Руденко // Вестник АГТУ. Серия: Морская техника и технология. 2013. № 1. С.148-154

References:

1. Rudenko, M.F. Solar energy sorption thermal transformers for heating and air conditioning systems// M.F. Rudenko, Y.V. Shipulina, V.N. Sainova A.A., Tokareva L.P., Tretyak. *Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region* 2022; (39):22-28(In Russ.)
2. Rudenko M.F., Y.V. Shipulina, A.M. Rudenko. Ensuring energy security in emergency situations of southern cities. Fire and technosphere safety and ways of improvement: 2020, Issue 19(5). Donetsk, GOVPO, "Academy of Civil Protection" of the Ministry of Emergency Situations of the DPR, 2020.:517-521. (In Russ.)
3. Brites, G.J.V.N. Influence of the design parameters on the overall performance of a solar adsorption refrigerator / G.J.V.N. Brites, J.J. Costa, V.A.F. Costa. *Renewable Energy*. 2016;86: 238-250
4. M.F. Rudenko, Y.V. Shipulina V.N. Sainova. Technical aspects of the development of solar-energy refrigeration units on solid sorbents/ *Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences*. 2023; 50(3):37-45(In Russ.)
5. Y.V. Shipulina, M.S. Karimov, M.F.Rudenko. Modeling and design development of an adsorber generator for an environmentally safe solar energy refrigeration unit/ *Chemical and oil and gas engineering*. 2013;2:36-41(In Russ.)
6. Rudenko M.F. Chivilenko Y.V., Antipov A.E. Improving the energy efficiency of environmentally safe solar refrigeration units. *Bulletin of the International Academy of Refrigeration*. Saint Petersburg – Moscow. 2006; 3:3-8(In Russ.)
7. Rudenko M.F. Solar energy thermal transformers of "dry" absorption of cyclic action: a monograph / M.F. Rudenko, Y.V.Shipulina. Astrakhan State Technical University.Astrakhan: Publishing House of AGTU, 2013. 172 p. (In Russ.)
8. A.S. USSR No.1983 S.S. USSR No.1983 Zakhidov R.A., Shadiev S.,Kirghizbaev D.A. Achilov B.M. Solar cooler adsorber generator (In Russ.)

9. Solar cooler adsorber generator: patent 2137991 Russian Federation. No. 98100862/06 / Rudenko M.F., Alzemenyev A.V., Anikhuvi Jacques Henri Djidjohe, Cherkasov V.I., Makeev P.A.; application 05.01.98 ; publ. 09/20/99, Bul. No. 26. 4s. (In Russ.)
10. Achilov B.M., Ch. Mangalzhayalav. Refrigeration unit with solid sorbent. *Refrigeration technology*. 1990; 2:5-7. (In Russ.)
11. Reactor of the solar cooling system absorber generator (variants): patent 2263859 Russian Federation. No. 2003106499/06 / Rudenko M.F., Ilyin A.K., Konopleva Y.V., Ilyin R.A., Zaikin E.Yu.; application no.07.03.2003; publ.10.11.2005;31:4. (In Russ.)
12. Likhachev V.A., Kuzmin S.L., Kamentseva Z.P. Shape memory effect Leningrad State University, 1987. 218с. (In Russ.)
13. Electrolyte for deposition of black anticorrosive oxide coatings on steel: patent 2365676 Russian Federation. No. 2008130824/02 / Doletskaya K.A., Kravtsov E.E., Gorskaya A.S., Miftakhova G.F., Rudenko M.F., Surkov M.I., Kirichenko V.I., Shnbor M.I., Ogorodnikova N.P., Kondratenko T.S.; application. 07/25/2008; publ. 08/27/2009, Bul. № 24. 4p.
14. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102472>. K. Missaoui Heat storage in solar adsorption refrigeration systems: A case study for indigenous fruits preservation/Kolthoum Missaoui, Abdelhamid KheiriNader, FrikhaSlimane, GabsiMohammed El Ganaoui. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2022;40: 102472
15. Y.Yu, Q.W. Pan, L.W. Wang. A small-scale silicagel-water adsorption system for domestic air conditioning and water heating by the recovery of solar energy. *Frontiers in Energy*. 2020;14:328–336 <https://link.springer.com/article/10.1007/s11708-019-0623-1>
16. Mariella Mateo-Villanueva, Rodolfo Echarri D. Solar adsorption refrigeration system: Comparison between equilibrium, universal and transient model. *Système frigorifique solaire à adsorption: Comparaison entre les modèles d'équilibre, universel et transitoire. International Journal of Refrigeration*. 2024;157: 23-33
17. Karimov M.S., Rudenko M.F., Shipulina Y.V. Improving the efficiency of an adsorption solar-energy thermal transformer. *Chemical and oil and gas engineering*. 2016; 3:31-35. (In Russ.)
18. Method of determining thermal loads on the reactor of an adsorber generator of a solar energy refrigeration unit /Yu.V. Shipulina, M.S. Karimov, M.F. Rudenko. *Bulletin of the AGTU. Series: Marine engineering and Technology*. 2013;1:148-154 (In Russ.)

Сведения об авторах:

Михаил Федорович Руденко, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Безопасность жизнедеятельности и инженерная экология»; mf.rudenko@mail.ru

Юлия Викторовна Шипулина, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Безопасность жизнедеятельности и инженерная экология»; aleera78@mail.ru

Виктория Николаевна Саинова, кандидат технических наук, заведующая кафедрой «Безопасность жизнедеятельности и инженерная экология» sainovav@yandex.ru

Елена Викторовна Андреева, кандидат технических наук, доцент кафедры «Безопасность жизнедеятельности и инженерная экология» elpetrovicheva1970@gmail.com

Information about authors:

Mikhail F. Rudenko, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Prof., Department of "Life Safety and Environmental Engineering"; mf.rudenko@mail.ru

Yulia V. Shipulina, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Assoc. Prof., Department of "Life Safety and Environmental Engineering"; aleera78@mail.ru

Victoria N. Sainova, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Head of the Department of Life Safety and Environmental Engineering; sainovav@yandex.ru

Elena V. Andreeva, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Department of "Life Safety and Environmental Engineering"; elpetrovicheva1970@gmail.com

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 17. 01.2025.

Одобрена после рецензирования/ Revised 06.03.2025.

Принята в печать/Accepted for publication 20.05.2025.

Метод обработки экспертных данных для построения эмпирических математических моделей сложных систем, функционирующих в нестабильных окружающих средах

Н.Л. Баламирзоев, В.Б. Мелехин

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

Резюме. Цель. Цель исследования сводится к разработке одного из методов построения математической модели строительного производства, базирующегося на обработке экспертных данных с применением инструментальных средств математического аппарата нечетких множеств типа лингвистических переменных и лингвистических функций. **Метод.** Данные обрабатываются методом регрессионного анализа и в результате формируется аналитическое выражение графика лингвистической функции, фактически представляющего собой аналитическое выражение, устанавливающее зависимость рассматриваемого показателя эффективности от влияющих на него факторов нестабильной экономической среды сложных систем (строительной организации). **Результат.** Построены аналитические зависимости графиков лингвистических функций, соответствующих различным показателям эффективности, используемые в качестве критериев оптимального принятия управленческих решений. Наибольший эффект можно получить путем постановки и решения различных задач многокритериальной оптимизации по Парето, используя для этого в качестве критериев оптимальности аналитические выражения нескольких показателей эффективности функционирования строительного производства. **Вывод.** Построение эмпирических выражений показателей эффективности исследуемых систем позволяет организовать на их основе оптимальное принятие управленческих решений и обеспечить эффективное функционирование сложных объектов управления в нестабильных условиях окружающей среды. Дальнейшее развитие исследования может быть связано с разработкой метода оптимального управления поведением различных социально-экономических и технических систем, функционирующих в спонтанно изменяющихся условиях окружающей среды на основе решения задач многокритериальной оптимизации и выработки оптимальных цепочек проводимых организационно-управленческих мероприятий.

Ключевые слова: нестабильные условия, спонтанные изменения, регрессионная математическая модель, оптимальное управление.

Для цитирования: Н.Л. Баламирзоев, В.Б. Мелехин. Метод обработки экспертных данных для построения эмпирических математических моделей сложных систем, функционирующих в нестабильных окружающих средах. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025; 52(2):63-73. DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-2-63-73

A method of processing expert data for constructing empirical mathematical models of complex systems operating in unstable environments

N.L. Balamirzoev, V.B. Melekhin

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

Abstract. Objective. The objective of the study is to develop a method for constructing a mathematical model of construction production based on processing expert data using tools of the mathematical apparatus of fuzzy sets such as linguistic variables and linguistic functions. **Method.**

The data are processed using regression analysis, resulting in an analytical expression of the linguistic function graph, which is actually an analytical expression establishing the dependence of the performance indicator under consideration on the factors of the unstable economic environment of complex systems (construction organization) that influence it. **Result.** Analytical dependencies of the graphs of linguistic functions corresponding to various performance indicators are constructed, used as criteria for optimal decision-making. The greatest effect can be achieved by setting and solving various problems of multi-criteria Pareto optimization, using analytical expressions of several performance indicators of construction production as optimality criteria. **Conclusion.** Constructing empirical expressions of performance indicators of the systems under study allows organizing optimal management decisions on their basis and ensuring the effective functioning of complex management objects in unstable environmental conditions. Further development of the research is associated with the development of a method for optimal control of the behavior of various systems operating in spontaneously changing environmental conditions based on solving problems of multi-criteria optimization and developing optimal chains of organizational and management measures.

Keywords: unstable conditions, spontaneous changes, regression mathematical model, optimal control

For citation: N.L. Balamirzoev, V.B. Melekhin. A method of processing expert data for constructing empirical mathematical models of complex systems operating in unstable environments. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2025;52(2):63-73. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-2-63-73

Введение. Строительные организации являются сложными экономическими объектами управления, построение общей математической модели которых аналитическим путем затруднено в силу существенного разнообразия их производственной деятельности как на различных интервалах времени отчетного периода, так и в зависимости от вида производимой строительной продукции. Ввиду же спонтанных изменений, происходящих в экономической среде строительных организаций (СО), фактически невозможно и построение адекватных эмпирических математических моделей производственной деятельности строительных организаций, т.к. получаемые в этом случае статистические данные фактически не отражают закономерности и тенденции функционирования и развития строительного производства как в краткосрочном периоде времени, так и в долгосрочной перспективе.

Обойти отмеченную выше проблему можно путем формализации производственных процессов в строительстве на основе нечетких множеств [1, 2]. Однако рассмотренные в данных работах модели не позволяют формализовать весь процесс строительного производства [3, 4] с учетом взаимодействия строительной организации с внешней спонтанно изменяющейся экономической средой.

Постановка задачи. К одному из достаточно эффективных подходов решения этой проблемы следует отнести построение эмпирической математической модели строительного производства на основе обработки экспертных данных, отражающих достаточно общие закономерности функционирования как отдельных, так и совокупности СО в различных условиях нестабильной экономической среды. Для решения этой задачи в настоящей работе предлагается использовать такие фундаментальные инструментальные средства нечетких множеств как лингвистические переменные (ЛП) [5, 6] и лингвистические функции (ЛФ) [7, 8].

Методы исследования. Лингвистические переменные и лингвистические функции являются основными инструментальными средствами практического применения математического аппарата нечетких множеств для формализации поведения сложных систем различного назначения, функционирующих в условиях недоброкачественной неопределенности. Иначе говоря, их эффективно использовать для построения математической модели

сложных производственных систем, когда не представляется возможным организовать сбор и обработку методами регрессионного анализа статистических данных, отражающих закономерности функционирования исследуемых объектов управления на различных интервалах времени отчетного периода.

Под лингвистической переменной (ЛП) следует понимать переменную, которая помимо количественных значений определяется еще и качественными или словесными значениями, называемыми термами [5]. Допустим, что в СО стоит проблема снижения себестоимости производимой строительной продукции. В общем случае ЛП, соответствующая этой проблеме, определяется следующей пятеркой:

$$ЛП = (H, T, Q, \beta_S, l),$$

где H – название ЛП «Себестоимость производимой строительной продукции»; T – терм множество или множество нечетких значений ЛП, элементом которого являются следующие термы: « $T_1(\mathcal{E}_S)$ – очень низкая»; « $T_2(\mathcal{E}_S)$ – низкая»; « $T_3(\mathcal{E}_S)$ – средняя»; « $T_4(\mathcal{E}_S)$ – высокая» и « $T_5(\mathcal{E}_S)$ – очень высокая себестоимость производимой строительной продукции»; Q – множество базовых значений ЛП, которое, как правило, ограничено снизу и сверху, т.е. $Q \in [q(min), q(max)]$.

Например, для ЛП соответствующей показателю эффективности $\mathcal{E}_S$ – «Себестоимость производимой строительной продукции», данные ограничения, соответственно, определяются текущим и желаемым значением себестоимости производимой строительной продукции в рассматриваемый отчетный период времени. Необходимо отметить, что на основе множества базовых значений ЛП формируется шкала ее нечетких и количественных оценок, на которой экспертным путем определяются граничные значения термов путем построения соответствующих им нечетких множеств (рис.1).

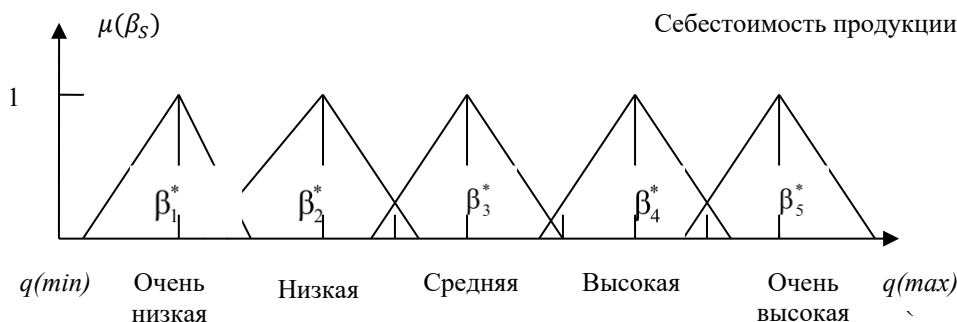


Рис. 1 – Шкала лингвистической переменной «Себестоимость строительной продукции»: ($\mu(\beta_S)$) – степень принадлежности значения β_S базовой переменной ЛП к нечеткому множеству, определяемому термом, в интервал численных значений которого оно попадает)

Fig. 1 – Scale of the linguistic variable “Cost of construction products”:

($\mu(\beta_S)$) – the degree of belonging of the value β_S of the basic variable to the fuzzy set defined by the term, in the range of numerical values of which it falls)

β_S – базовая переменная ЛП, определяющая ее количественное текущее значение, например, фактическая на текущий момент времени себестоимость производимой строительной продукции;

L – преобразования, выполняемые над различными значениями ЛП, служащие для перехода от ее количественных оценок к качественным или словесным значениям и, наоборот, для перехода от словесных (качественных) к ее количественным значениям.

Так, выполнение прямых преобразований, относящихся к параметру L , сводится к переходу от численных значений ЛП, определяемых фактическими значениями ее базовой переменной β_S к качественному их представлению, например, в виде следующих пар [9]:

$$\beta_S = \langle \mu(\beta_S), T_i(\mathcal{E}_S) \rangle, i = \overline{1,5},$$

где $T_i(\mathcal{E}_S)$ – нечеткое значение ЛП или ее терм, в интервал численных значений которого попадает текущая величина ее базовой переменной β_S .

Следует отметить, что такое представление различных значений базовой переменной ЛП позволяет сравнивать их между собой без использования операции нечеткой эквивалентности [10], требующей выполнения трудоемких вычислений, связанных с определением минимумов и максимумов участвующих в сравнении величин различных показателей эффективности. Для нечеткого же описания текущих количественных значений β_S показателя эффективности СО представленного с помощью соответствующей ЛП можно использовать следующие преобразования [9]:

$$\Psi: \beta_S \rightarrow \begin{cases} T_1(\mathcal{E}_S), \text{ если } 0 < \beta_S \leq r_1^*; \\ T_1(\mathcal{E}_S), \text{ если } r_1^* < \beta_S \leq r_2^*; \\ \dots & \dots \\ T_1(\mathcal{E}_S), \text{ если } r_5^* < \beta_S \leq r_6^*, \end{cases}$$

позволяющие каждому значению базовой переменной β_S ЛП, поставить в соответствие один из ее термов $T_j(\mathcal{E}_S)$, $j = \overline{1,5}$, где r_{j-1}^*, r_j^* – соответственно нижняя и верхняя границы числовых значений нечеткого множества соответствующего терму $T_j(\mathcal{E}_S)$.

В этом случае степень нечеткого равенства $\rho(\beta_i^1, \beta_i^2)$ двух значений β_i^1 и β_i^2 базовой переменной ЛП, представленных соответственно парами $\langle \mu(\beta_i^1), T_j^1(\mathcal{E}_S) \rangle$ и $\langle \mu(\beta_i^2), T_j^2(\mathcal{E}_S) \rangle$, может вычисляться на основе следующего характеристического уравнения [9]:

$$\rho(\beta_i^1, \beta_i^2) = \begin{cases} 1, & \text{если } (|\mu(\beta_i^1) - \mu(\beta_i^2)| \leq \varepsilon) \& (T_j^1(\mathcal{E}_S) = T_j^2(\mathcal{E}_S)); \\ 1 - \frac{|\beta_i^1 - \beta_i^2|}{|r_j^* - r_{j-1}^*|}, & \text{если } (T_j^1(\mathcal{E}_S) = T_j^2(\mathcal{E}_S)); \\ 0, & \text{если } T_j^1(\mathcal{E}_S) \neq T_j^2(\mathcal{E}_S), \end{cases}$$

где ε – величина допустимого отклонения фактического значения базовой переменной β_i^1 от заданного ее значения β_i^2 , определяемая на основе требуемой точности решения стоящей в текущий момент времени задачи (например, допустимая ошибка точности расчета сметной стоимости проектируемого сооружения); $|\beta_i^1 - \beta_i^2|$ – абсолютная величина разности.

После получения оценки степени равенства $\rho(\beta_i^1, \beta_i^2)$ сравниваемых между собой значений β_i^1 и β_i^2 оцениваемого показателя эффективности $\mathcal{E}_S$ строительного производства принимается следующее решение:

– сравниваемые значения β_i^1 и β_i^2 равны между собой, если $\rho(\beta_i^1, \beta_i^2) = 1$, т.е. оба значения показателя эффективности $\mathcal{E}_S$ попадают в заданную окрестность ε одной и той же точки на шкале допустимых численных значений соответствующей ему ЛП;

– сравниваемые значения показателя эффективности нечетко равны между собой при выполнении условия $0 < \rho(\beta_i^1, \beta_i^2) < 1$, т.е. если они попадают в интервал численных значений одного и того же терма соответствующей этому показателю ЛП. В этом случае оценка степени равенства определяется по их относительной удаленности от центра тяжести функции принадлежности;

– сравниваемые значения заданного показателя эффективности $\mathcal{E}_S$ строительного производства не равны между собой, если степень их нечеткого равенства принимает значение, равное $\rho(\beta_i^1, \beta_i^2) = 0$, т.е. они попадают в интервалы численных значений различных термов.

При этом, например, степень принадлежности $\mu(\beta_i^1)$ значения β_i^1 к нечеткому множеству, определяемому термом $T_j^1(\mathcal{E}_S)$, можно вычислить следующим образом:

$$\mu(\beta_i^1) = 1 - \frac{\beta_i^1}{r_j^*}.$$

Обратный же переход или переход от нечеткого (словесного) значения ЛП, определяемого, например, термом $T_j^1(\mathcal{E}_S)$, к количественной оценке β_i^1 показателя эффективности $\mathcal{E}_S$ осуществляется по проекции на шкалу ее численных значений из максимума функции принадлежности нечеткого множества соответствующего этому терму. Например, для термина $T_2^1(\mathcal{E}_S)$ – «Низкая себестоимость строительной продукции» рассматриваемого показателя эффективности строительного производства переменная β_i^1 будет определяться значением, равным величине β_2^* (рис.1).

В общем случае, лингвистические функции (ЛФ), позволяющие формализовать как в нечеткой форме, так и в аналитическом виде характер влияния параметров состояния экономической среды на показатели эффективности строительного производства исследуемой СО, по аналогии с показателями, рассмотренными в работе [9], определяются следующей пятеркой:

$$ЛФ = (H, ЛП_3 \{F_{H3}(k), k = \overline{1, m}\}, M_1, M_2, \Psi),$$

где H – название лингвистической функции; ЛП₃ – зависимая лингвистическая переменная ЛФ, определяющая исследуемый показатель эффективности СО $\mathcal{E}_S$. Необходимо отметить, что название ЛФ, как правило, совпадает с названием ее зависимой ЛП; $F_{H3}(k)$ – независимая ЛП, соответствующая k – му фактору экономической среды, влияющему на рассматриваемый показатель эффективности строительного производства; M_1 – матрица ЛФ, элементы которой определяются экспертным путем в виде соответствия между нечеткими значениями рассматриваемого показателя эффективности $\mathcal{E}_S$ (зависимой переменной ЛФ) и набором нечетких значений влияющих на него факторов внутренней и внешней экономической среды СО (независимых переменных ЛФ); M_2 – матрица ЛФ, определяющая соответствие между количественными значениями зависимой переменной и набором количественных оценок влияющих на нее факторов экономической среды, определяющих независимые переменные лингвистической функции; Ψ – график ЛФ или аналитическая зависимость между значениями соответствующего этой функции показателя эффективности $\mathcal{E}_S$ (зависимой ЛП) и параметрами состояния экономической среды исследуемого строительного производства, определяющими независимые переменные лингвистической функции $F_{H3}(k), k = \overline{1, m}$.

Для построения ЛФ вначале формируются все входящие в ее структуру лингвистические переменные с соответствующими названиями. Затем по экспертным данным формируется соответствие между терминами данных ЛП и строится матрица лингвистической функции M_1 . Для этого на основе опроса экспертов каждому нечеткому значению зависимой ЛП в соответствие ставится набор нечетких значений влияющих на нее независимых ЛП. Затем осуществляется переход от нечетких значений ЛП по максимумам функций принадлежности нечетких множеств, определяющих нечеткие значения переменных ЛФ, к четким их значениям. Данные полученной матрицы соответствий M_2 количественных оценок ЛП строящейся лингвистической функции рассматриваются как псевдостатистика, найденная экспертным путем, которая обрабатывается методом множественного регрессионного анализа. В результате получается график искомой лингвистической функции. Наиболее наглядно эффективность применения графиков ЛФ в качестве математической модели обеспечивающей возможность принятия эффективных управленческих решений в системе управления строительным производством, можно представить следующим образом: пусть требуется организовать подсистему поддержки принятия решений в системе организационного управления эффективностью производственной деятельности СО, которую в общем

случае можно охарактеризовать множеством различных показателей. Например, производительностью труда, себестоимостью выпускаемой строительной продукции, качеством выполняемых строительно-монтажных работ и т.д.

В этом случае в структурированном виде метод построения графиков ЛФ для различных показателей эффективности строительного производства будет иметь следующее содержание.

Входные переменные: множество используемых в формируемой математической модели показателей эффективности $\mathcal{E} = \{\mathcal{E}_{k_1}\}$, $k_1 = \overline{1, n_1}$ и параметров состояния $F = \{F_{k_2}\}$, $k_2 = \overline{1, n_2}$ внешней и внутренней экономической среды строительного производства, влияющих на данные показатели эффективности.

Промежуточные переменные: соответствия между нечеткими значениями, найденными экспертным путем и количественными оценками заданных показателей эффективности $\mathcal{E}_{k_1} \in \mathcal{E}$ и параметров состояния $F_{k_2} \in F$ экономической среды строительного производства.

Выходные переменные: регрессионные модели показателей эффективности $\mathcal{E}_{k_1} \in \mathcal{E}$ полученные в виде соответствующих им графиков ЛФ и количественные оценки входящих в их структуру коэффициентов пропорциональности $a_z^{k_1}$, $z = \overline{1, n_{k_1}}$.

Метод.

Начало. 1. Принять $k_1 = 1$.

2. Определить параметры состояния экономической среды строительного производства $F_{k_2} \in F$ влияющие на показатель эффективности $\mathcal{E}_{k_1} \in \mathcal{E}$. Принять, например, в качестве математической модели определяющей зависимость рассматриваемого показателя эффективности $\mathcal{E}_{k_1}$ от параметров состояния $F_{k_2} \in F$ линейную регрессионную многофакторную модель следующего вида:

$$\mathcal{E}_{k_1} = a_1^{k_1} F_1 + a_2^{k_1} F_2 + \dots + a_{k_2}^{k_1} F_{k_2}. \quad (1)$$

3. Построить для каждого входящего в структуру уравнения (1) параметра состояния экономической среды строительного производства $F_{k_2} \in F$ соответствующую ему лингвистическую переменную ЛП $_{k_2}$ с названием « k_2 – й параметр состояния экономической среды строительной организации».

4. Сформировать для показателя эффективности $\mathcal{E}_{k_1} \in \mathcal{E}$ соответствующую ему лингвистическую переменную ЛП $_{k_1}$ с названием «Показатель эффективности $\mathcal{E}_{k_1}$ ».

5. Опросить высококвалифицированных экспертов и построить по полученным экспертным данным матрицу M_1 лингвистической функции, для которой роль зависимой лингвистической переменной играет ЛП $_{k_1}$, а роль независимых лингвистических переменных исполняют переменные ЛП $_{k_2}$, соответствующие влияющим на показатель эффективности $\mathcal{E}_{k_1}$ факторам экономической среды строительной организации $F_{k_2} \in F$.

Пусть, например, для показателя эффективности $\mathcal{E}_{k_1}$ строительного производства «Себестоимость выпускаемой строительной продукции» по экспертным данным построена матрица M_1 , отражающая влияние на него следующих параметров состояния $F_{k_2} \in F$: стоимость строительных материалов, оплата труда производственных рабочих, затраты связанные с эксплуатацией строительной техники (табл.1), где $m(k_1)$ – количество параметров состояния экономической среды СО, влияющих на показатель эффективности $\mathcal{E}_{k_1}$.

В табл.1 столбец, соответствующий терму $T_3(\mathcal{E}_{k_1})$ означает, что среднему значению показателя эффективности $\mathcal{E}_{k_1}$ эксперты в соответствии поставили большое значение $T_5(F_1)$ параметра состояния F_1 , среднее значение $T_3(F_2)$ параметра состояния $F_2, \dots$, среднее значение $T_3(F_{m(k_2)})$ параметра состояния $F_{m(k_2)}$.

Таблица 1. Соответствие между нечеткими значениями показателя эффективности $\mathcal{E}_{k_1}$ и параметрами состояния $F_{k_2} \in F$ экономической среды строительного производства, установленных экспертным путем

Table 1. Correspondence between fuzzy values of the efficiency indicator $\mathcal{E}_{k_1}$ and the state parameters $F_{k_2} \in F$ of the economic environment of construction production, established by experts

$T_j(\mathcal{E}_{k_1})/$ $T_j(F_{k_2})$	$T_1(\mathcal{E}_{k_1})$	$T_2(\mathcal{E}_{k_1})$	$T_3(\mathcal{E}_{k_1})$	$T_4(\mathcal{E}_{k_1})$	$T_5(\mathcal{E}_{k_1})$
$T_j(F_1)$	$T_5(F_1)$	$T_5(F_1)$	$T_5(F_1)$	$T_5(F_1)$	$T_5(F_1)$
$T_j(F_2)$	$T_2(F_2)$	$T_2(F_2)$	$T_3(F_2)$	$T_3(F_2)$	$T_4(F_2)$
...		...			...
$T_j(F_{m(k_2)})$	$T_5(F_{m(k_2)})$	$T_5(F_{m(k_2)})$	$T_5(F_{m(k_2)})$	$T_3(F_{m(k_2)})$	$T_2(F_{m(k_2)})$

6. Определить значения базовой переменной $\beta_{k_1}^*(T_j(\mathcal{E}_{k_1}))$, $j = \overline{1,5}$ ЛП $_{k_1}$ и базовых переменных $x(T_j(F_{k_2}))$ ЛП $_{k_2}$ по проекциям из максимумов функций принадлежности нечетких множеств, соответствующих термам зависимой $\mathcal{E}_{k_1} \in \mathcal{E}$ и независимых $F_{k_2} \in F$ переменных формируемой ЛФ, на базовую шкалу их численных значений. Используя полученные таким образом данные построить таблицу соответствий M_2 между численными значениями зависимой и независимых лингвистических переменных строящейся ЛФ.

Например, для показателя эффективности $\mathcal{E}_{k_1}$ «Себестоимость производимой строительной продукции» справедлива табл. 2, определяющая соответствие между его количественными значениями β_z^* , $z = \overline{1,5}$ и количественными оценками x_{jz}^* параметров состояния $F_{k_2} \in F$, найденными по нечетким их значениям, приведенным в табл. 1.

Таблица 2. Соответствие между количественными значениями $\beta_{k_1}^*(T_j(\mathcal{E}_{k_1}))$ показателя эффективности $\mathcal{E}_{k_1}$ и количественными оценками $x(T_j(F_{k_2}))$, влияющих на него параметров состояния $F_{k_2} \in F$

Table 2. Correspondence between the quantitative values $\beta_{k_1}^*(T_j(\mathcal{E}_{k_1}))$ of the efficiency indicator $\mathcal{E}_{k_1}$ and the quantitative estimates $x(T_j(F_{k_2}))$, of the state parameters $F_{k_2} \in F$ that influence it

$\beta_{k_1}^*(T_j(\mathcal{E}_{k_1}))/x(T_j(F_{k_2}))$	β_1^*	β_2^*	β_3^*	β_4^*	β_5^*
$x(T_j(F_1))$	x_{13}^*	x_{14}^*	x_{15}^*	x_{15}^*	x_{15}^*
$x(T_j(F_2))$	x_{22}^*	x_{22}^*	x_{23}^*	x_{23}^*	x_{24}^*
...		...			...
$x(T_j(F_5))$	x_{51}^*	x_{54}^*	x_{53}^*	x_{53}^*	x_{52}^*

В табл. 2 использованы следующие обозначения: β_z^* , $z = \overline{1,5}$ – количественные оценки показателя эффективности $\mathcal{E}_{k_1}$, найденные по термам $T_j(\mathcal{E}_{k_1})$ соответствующей ему лингвистической переменной ЛП $_{k_1}$; $x_{jk_2}^*$ – количественные оценки факторов экономической среды СО F_{k_2} , найденные по термам $T_j(F_{k_2})$ соответствующих им ЛП $_{k_2}$.

Например, количественному значению показателя эффективности $\mathcal{E}_{k_1}$, найденному по максимуму функции принадлежности нечеткого множества, определяющего интервал численных значений термина $T_1(\mathcal{E}_{k_1})$, соответствуют следующие численные значения параметров состояния экономической среды СО $x_{13}^*, x_{22}^*, \dots, x_{51}^*$, найденные по соответствующим им термам ЛП $_{k_2}$ (см. табл. 2).

7. Обработать данные, полученные в таблице соответствий количественных значений зависимых и независимых ЛП (табл. 2), используя многофакторный регрессионный анализ [11-13] вычислить коэффициенты $a_{k_2}^{k_1}$ уравнения (1), определяющего график Ψ_{k_1}

строющейся лингвистической функции, соответствующей показателю эффективности строительного производства $\mathcal{E}_{k_1} \in \mathcal{E}$.

8. Построить аналитическое выражение графика ЛФ Ψ_{k_1} :

$$\mathcal{E}_{k_1} = a_1^{k_1} F_1 + a_2^{k_1} F_2 + \dots + a_5^{k_1} F_5.$$

9. Проверить условие « $k_1 = n_1$ »: если условие выполняется, то перейти к п. 10; в противном случае, $k_1 = k_1 + 1$, перейти к п. 2.

10. **Конец.**

Следует отметить, что для построения аналитической зависимости $\mathcal{E}_{k_1} = a_1^{k_1} F_1 + a_2^{k_1} F_2 + \dots + a_5^{k_1} F_5$ требуется решить следующее матричное уравнение [14-15]:

$$(X^T X)A = X^T Y,$$

где X – матрица, состоящая из элементов табл. 2, например, первая строка данной матрицы включает следующие элементы: $x_{13}^*, x_{14}^*, x_{15}^*, x_{15}^*, x_{15}^*, x_{15}^*$; X^T – транспонированная матрица X ; A – вектор столбец неизвестных коэффициентов уравнения $\mathcal{E}_{k_1} = a_1^{k_1} F_1 + a_2^{k_1} F_2 + \dots + a_5^{k_1} F_5$; Y – вектор столбец, состоящий из элементов $\beta_{k_1}^*(T_j(\mathcal{E}_{k_1}))$ первой строки табл. 2.

Отсюда, неизвестные коэффициенты уравнения $\mathcal{E}_{k_1} = a_1^{k_1} F_1 + a_2^{k_1} F_2 + \dots + a_5^{k_1} F_5$ вычисляются на основе следующего уравнения [16]:

$$A = (X^T X)^{-1} (X^T Y),$$

где $(X^T X)^{-1}$ – матрица обратная матрице $(X^T X)$.

Полученные таким способом аналитические зависимости графиков лингвистических функций, соответствующих различным показателям эффективности $\mathcal{E}_{k_1} \in \mathcal{E}$ строительного производства, используются в качестве уравнений эмпирической модели рассматриваемого сложного объекта. Кроме того, они позволяют на основе факторного анализа методом цепной подстановки [17,18] установить характер автономного влияния различных факторов экономической среды $F_{k_2} \in F$ на эффективность текущего состояния строительного производства. Для реализации метода цепной подстановки в уравнениях $\mathcal{E}_{k_1} = a_1^{k_1} F_1 + a_2^{k_1} F_2 + \dots + a_5^{k_1} F_5$ поочередно за исключением исследуемого, фиксируются значения всех факторов экономической среды $F_{k_2} \in F$ строительного производства. Например, пусть на первом шаге проводимого исследования устанавливается влияние фактора экономической среды F_1 на показатель эффективности $\mathcal{E}_1$. В этом случае, для всех остальных факторов влияния $F_{k_2} \in F$ определяются наиболее вероятные их фиксированные значения, например, $f_2^*, f_3^*, \dots, f_n^*$, которые подставляются в уравнение $\mathcal{E}_1 = a_1^1 F_1 + a_2^1 F_2 + \dots + a_5^1 F_5$. После этого, меняя значения f_1^* фактора F_1 в заданных пределах, определяется влияние его количественного значения на величину показателя эффективности $\mathcal{E}_1$. Затем в качестве следующего исследуемого рассматривается фактор F_1 , а значения всех остальных факторов $F_{k_2} \in F$ фиксируются, и устанавливается его влияние на показатель эффективности $\mathcal{E}_1$ и т.д., пока не будет исследовано влияние всех факторов экономической среды СО на показатели эффективности строительного производства $\mathcal{E}_{k_1} \in \mathcal{E}$.

В свою очередь, это позволяет для различных показателей эффективности $\mathcal{E}_{k_1} \in \mathcal{E}$ определить наиболее чувствительные с точки зрения их регулирования параметры влияния внешней и внутренней экономической среды СО и реализовать на этой основе авторскую методику оптимального управления строительным производством.

Обсуждение результатов. Рассмотрим методику выбора в подсистеме принятий решений на основе эмпирической математической модели управляющих воздействий $U_z \in U$, обеспечивающих наиболее эффективную реализацию строительного производства в изменяющихся условиях экономической среды СО.

После построения эмпирической зависимости, например, $\mathcal{E}_1 = a_1^1 F_1 + a_2^1 F_2 + \dots + a_5^1 F_5$ для показателя эффективности строительного производства $\mathcal{E}_1$ интегральный критерий $\mathcal{E}^*$ выбора на альтернативной основе наиболее эффективных организационно-управленческих мероприятий в текущей ситуации экономической среды СО будет иметь следующий вид:

$$\mathcal{E}^* = (\mathcal{E}_1 = a_1^1 F_1 + a_2^1 F_2 + \dots + a_z^1 F_z + \dots + a_5^1 F_5 \Rightarrow \max),$$

при наличии ограничения в виде равенства:

$$\mathcal{E}_2 = a_1^2 F_1^2 + a_2^2 F_2^2 + a_3^2 F_4^2 = C_2 \mp \varepsilon,$$

где F_z – затраты, связанные с обработкой альтернативных организационно-управленческих мероприятий U_z ; C_2 – требуемая себестоимость выполнения подрядных работ с допустимым отклонением ε .

Пусть, в экономической среде строительной организации сложилась проблемная ситуация, характеризующаяся очень низкой производительностью труда из-за частых простоев связанных с выходом из строя изношенной строительной техники. В этом случае, на основе возникшей проблемной ситуации, в организационной системе управления производственной деятельностью СО целесообразно сформировать следующие альтернативные организационно-управленческие мероприятия.

1. U_1 – проводить периодический текущий ремонт вышедшей из строя строительной техники с общими затратами в течение отчетного периода, равными: $G_2 = \sum_{h=1}^d m_h^* W_h$, где m_h^* , W_h – соответственно среднее количество выходов из строя строительной техники вида h в течение отчетного периода и средняя стоимость одного ремонта этой техники; d – количество видов имеющейся у СО строительной техники.

2. U_2 – выполнить капитальный ремонт наиболее часто выходящей из строя строительной техники, который требует следующих затрат: $G_2 = \sum_{h_1=1}^{d_1} m_{h_1}^* W_{h_1}$, где $m_{h_1}^*$ – количество выходов из строя в течение отчетного периода строительной техники h_1 вида; W_{h_1} – средняя стоимость капитального ремонта строительной техники h_1 вида;

3. U_3 – провести замену часто выходящей из строя строительной техники из-за ее высокого износа новой техникой, закупка которой приводит к затратам, равным: $G_3 = \sum_{h_2=1}^{d_2} m_{h_2}^* W_{h_2}$. Здесь $m_{h_2}^*$ – количество строительной техники h_2 вида, требующей срочной замены; W_{h_2} – рыночная стоимость одной единицы строительной техники h_2 вида.

Определение наиболее эффективного управленческого воздействия в полученном множестве альтернатив в сложившейся проблемной ситуации на объекте управления (строительном производстве) осуществляется в системе принятия решений по максимуму принятого выше критерия выбора. Для этого в данный критерий подставляются значения параметров состояния, которые можно получить в результате обработки различных управляющих мероприятий и оценки стоимости их реализации.

Например, обработка управления U_1 позволяет обеспечить минимальный рост производительности труда и минимальные затраты, а обработка управления U_3 – максимальный рост производительности труда при максимальных затратах. Следовательно, эффективным образом поставленную выше задачу целесообразно сформулировать и решить в виде двухкритериальной задачи, в которой один из критериев «рост производительности труда» максимизируется, а второй критерий «затраты, связанные с ростом производительности труда» – минимизируется. В этом случае применение метода многокритериальной оптимизации по Парето позволяет найти наиболее эффективное компромиссное решение данной задачи [19,20].

Таким образом, приведенный пример, показывает эффективность применения предложенных инструментальных средств позволяющих подсистеме принятия решений определять на альтернативной основе наиболее эффективные управленческие воздействия в различных проблемных ситуациях ОС в условиях неопределенности.

Вывод. Резюмируя вышесказанное, можно сделать следующие основные выводы.

1. Применение таких фундаментальных средств нечетких множеств как лингвистические переменные и функции позволяет эффективным образом обрабатывать данные, полученные экспертным путем, и на этой основе строить эмпирические математические модели сложных систем и процессов в условиях с недоброкачественной неопределенностью.

2. Построение эмпирических выражений показателей эффективности исследуемых систем позволяет организовать на их основе оптимальное принятие управленческих и хозяйственных решений и таким образом обеспечить эффективное функционирование сложных объектов управления в нестабильных условиях окружающей среды.

3. Дальнейшее развитие предложенного в работе принципа управления поведением сложных систем в условиях неопределенности может быть связано с разработкой метода оптимального управления поведением различных социально-экономических и технических систем функционирующих в спонтанно изменяющихся условиях окружающей среды на основе постановки решения задач многокритериальной оптимизации и выработки оптимальных цепочек проводимых организационно-управленческих мероприятий.

Библиографический список:

1. Лapidус А.А., Макаров А.Н. Теория нечетких множеств на этапах моделирования организации строительных процессов возведения многоэтажных зданий // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 6. С. 66-71.
2. Лapidус А.А., Макаров А.Н. Нечеткая модель организации строительного процесса // Известия вузов. Инвестиции. Строительство Недвижимость. 2017. Том 7. № 1. С. 59-68.
3. Daniel W. Helpin, Ronald W. Woodhead. Construction Management. New York: Wiley, 2016. 483 p.
4. Олейник П.П. Организация строительного производства. М.: АСВ, 2010. 575 с.
5. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение для принятия приближенных решений: пер. с англ. М.: МИР, 1976. 168 с.
6. Мелехин В.Б., Хачумов М.В. Управление целенаправленной деятельностью автономных летающих роботов в нестабильном окружении. СПб.: Политехника, 2023. 248 с.
7. Мелехин В.Б., Хачумов М.В. Планирование поведения автономных интеллектуальных мобильных систем в условиях неопределенности. СПб.: Политехника, 2022. 276 с.
8. Берштейн Л.С., Мелехин В.Б. Планирование поведения интеллектуального робота. М.: Энергоатомиздат, 1994. 240 с.
9. Берштейн Л.С., Казупаев В.М., Коровин С.Я., Мелихов А.Н. Параллельный процессор нечеткого вывода для ситуационных экспертных систем // Известия РАН СССР. Техническая кибернетика. 1990. № 5. С. 181-190.
10. Мелехин В.Б., Хачумов В.М. Управление технологическим процессом с нечеткой логикой обработки знаний // Проблемы управления. 2019. №1. С. 73-81.
11. Выгодчикова И. Ю. Алгоритм оценки параметров линейной множественной модели регрессии по минимаксному критерию // Прикладная информатика. 2015. Том 10. № 4(58). С. 105-115.
12. Мещеряков В. В. Задачи по статистике и регрессионному анализу с MATLAB. М.: Диалог-МИФИ, 2009. 448 с.
13. Син Такахаши. Занимательная статистика. Регрессионный анализ. М.: ДМК Пресс, 2023. 224 с.
14. Стренг Г. Линейная алгебра и ее применения. М.: Мир, 1980. 454 с.
15. Шилин А.И. Линейная алгебра с приложениями: учеб. пособие для вузов. СПб.: Лань, 2021. 248 с.
16. Беллман, Р. Введение в теорию матриц. М.: Наука, 1976. 351 с.
17. Табекин А.В., Табекин П.А., Табекина А.А. Методы принятия управленческих решений на основе детерминированного факторного анализа // Журнал исследований по управлению. 2017. Том 3. № 5. С. 8-25.
18. Соколов Г.А., Сагитов Р.В. Введение в регрессионный анализ и планирование регрессионных экспериментов в экономике: учеб. пособие для вузов. М.: ИНФРА-М, 2017. 201 с.
19. Зак Ю.А. Прикладные задачи многокритериальной оптимизации. М.: Экономика, 2014. 455 с.
20. Бородин А.И., Выгодчикова И.Ю., Горский М.А. Методы оптимизации в экономике и финансах. М.: Юрайт, 2022. 157 с.

References:

1. Lapidus A.A., Makarov A.N. Fuzzy set theory at the stages of modeling the organization of construction processes for the construction of multi-story buildings. *Industrial and civil engineering*. 2016;6:66-71.(In Russ.)

2. Lapidus A.A., Makarov A.N. Fuzzy model of the organization of the construction process. *News of universities. Investments. Construction Real Estate*. 2017; 7(1):59-68. (In Russ.)
3. Daniel W. Helpin, Ronald W. Woodhead. *Construction Management*. New York: Willey, 2016. 483 p.
4. Oleynik P.P. Organization of construction production. Moscow: ASV, 2010. 575 p. (In Russ.)
5. Zade L. The concept of a linguistic variable and its application to making approximate decisions: trans. from English. Moscow: MIR, 1976. 168 p. (In Russ.)
6. Melekhin VB, Khachumov MV Control of goal-oriented activity of autonomous flying robots in an unstable environment. St. Petersburg: Politekhnik, 2023. 248 p. (In Russ.)
7. Melekhin VB, Khachumov MV Planning the behavior of autonomous intelligent mobile systems under uncertainty. St. Petersburg: Politekhnik, 2022. 276 p. (In Russ.)
8. Bershtein LS, Melekhin VB Planning the behavior of an intelligent robot. Moscow: Energoatom-publishing house, 1994. 240 p. (In Russ.)
9. Bershtein L.S., Kazupaev V.M., Korovin S.Ya., Melikhov A.N. Parallel processor of fuzzy inference for situational expert systems. *Bulletin of the USSR Academy of Sciences. Technical Cybernetics*. 1990;5:181-190. (In Russ.)
10. Melekhin V.B., Khachumov V.M. Control of the technological process with fuzzy logic of knowledge processing. *Problems of Management*. 2019;1:73-81. (In Russ.)
11. Vygodchikova I.Yu. Algorithm for estimating the parameters of a linear multiple regression model using the minimax criterion. *Applied Informatics*. 2015; 10(4(58)):105-115. (In Russ.)
12. Meshcheryakov V. V. Problems in Statistics and Regression Analysis with MATLAB. Moscow: Dialog-MIFI, 2009. 448. (In Russ.)
13. Shin Takahashi. Entertaining Statistics. Regression Analysis. Moscow: DMK Press, 2023. 224 p. (In Russ.)
14. Streng G. Linear Algebra and Its Applications. Moscow: Mir, 1980. 454 p.
15. Shilin A.I. Linear Algebra with Applications: A Textbook for Universities. St. Petersburg: Lan, 2021. 248 p. (In Russ.)
16. Bellman, R. Introduction to Matrix Theory. Moscow: Nauka, 1976. 351 p. (In Russ.)
17. Tabekina A. V., Tabekina P. A., Tabekina A. A. Methods of making management decisions based on deterministic factor analysis. *Journal of Management Studies*. 2017; 3(5): 8-25. (In Russ.)
18. Sokolov G.A., Sagitov R.V. Introduction to regression analysis and planning of regression experiments in economics: a textbook for universities. Moscow: INFRA-M, 2017. 201 p. (In Russ.)
19. Zak Yu.A. Applied problems of multicriteria optimization. Moscow: Economica, 2014. 455 p. (In Russ.)
20. Borodin A.I., Vygodchikova I.Yu., Gorsky M.A. Optimization methods in economics and finance. Moscow: Yurait, 2022. 157 p. (In Russ.)

Сведения об авторах:

Назим Лиодинович Баламирзоев, кандидат экономических наук, доцент, ректор, dstu@dstu.ru
Владимир Борисович Мелехин, доктор технических наук, профессор.

Information about authors:

Nazim L. Balamirzoev, Cand. Sci. (Econom.), Assoc. Prof., Rector, dstu@dstu.ru.
Vladimir B. Melekhin, Dr. Sci. (Eng.), Professor.

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 29.03.2025.

Одобрена после рецензирования/ Revised 06.05.2025.

Принята в печать/Accepted for publication 20.05.2025.

Сервис управления и анализа инцидентов информационной безопасности

О.Ю. Башарина, Е.В. Буценко, А.С. Еремеев

Уральский государственный экономический университет,
620144, г. Екатеринбург, ул.8 Марта, 62, Россия

Резюме. Цель. В работе рассмотрены вопросы проектирования и разработки сервиса для автоматизации процессов управления и анализа инцидентами информационной безопасности для металлургического предприятия; обследованы и описаны основные этапы и действия управления инцидентами на данном предприятии. **Метод.** Программный сервис, позволяющий автоматизировать процессы мониторинга, оценки и анализа нежелательных и неожиданных событий информационной безопасности, разработан в среде Visual Studio Code на высокоуровневом языке программирования Python. Для расширения функционала созданного программного приложения использовались дополнительные фреймворки и необходимые библиотеки. Хранение информации об инцидентах компании организовано в созданной базе данных. **Результат.** Описан алгоритм разработки программного сервиса, представлены примеры экранных форм данного приложения. Функционал сервиса позволяет получать различную аналитику: общий и детальный анализ произошедших инцидентов по типам, способам обнаружения, временным затратам на решение инцидента, уровню критичности, статусу, способу обнаружения, скорости реагирования, причиненным последствиям. **Вывод.** Апробация программного сервиса в отделе информационной безопасности показала эффективное обнаружение новых атак и оперативную защиту информационных систем и автоматизированного оборудования предприятия. Анализ инцидентов направлен также на выявление проблемных участков в работе служб информационной безопасности компании, устранение которых позволит гораздо быстрее обнаруживать нежелательные события и минимизировать повторное появление инцидентов и их последствия.

Ключевые слова: программная система, информационная безопасность, инцидент, угроза, распознавание, анализ, управление, реагирование

Для цитирования: О.Ю. Башарина, Е.В. Буценко, А.С. Еремеев. Сервис управления и анализа инцидентов информационной безопасности. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025; 52(2):74-80. DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-2-74-80

Information security incident management and analysis service

O.Yu. Basharina, E.V. Butsenko, A.S. Ereemeev

Ural State University of Economics,
62 8 Marta St., Yekaterinburg 620144, Russia

Abstract. Objective. The paper considers the issues of designing and developing a service for automating the management and analysis of information security incidents for a metallurgical enterprise. The main stages and actions of incident management at the enterprise are examined and described. **Methods.** A software service that allows you to automate the processes of monitoring, evaluating and analyzing undesirable and unexpected information security events has been developed in the Visual Studio Code environment in the high-level Python programming language. To expand the functionality of the created software application, additional frameworks and the necessary libraries were used. The storage of information about the company's incidents is organized in the created database. **Result.** The article describes the algorithm for developing a software service, and provides examples of screen forms of this application. The functionality of the service

allows you to receive various analytics: a general and detailed analysis of incidents by type, detection methods, time spent on solving the incident, the level of criticality, status, method of detection, speed of response, and the consequences caused. **Conclusion.** Testing of the software service demonstrated effective detection of new attacks and prompt protection of information systems and automated equipment of the enterprise. Incident analysis is aimed at identifying problem areas in the work of information security services, the elimination of which will allow for faster detection of unwanted events and minimization of the recurrence of incidents and their consequences.

Keywords: software system, information security, incident, threat, recognition, analysis, management, response

For citation: O.Yu. Basharina, E.V. Butsenko, A.S. Ereemeev. Information security incident management and analysis service. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2025;52(2):74-80. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-2-74-80

Введение. В современном мире с развитием IT-технологий обеспечение информационной безопасности (ИБ) является неотъемлемой частью построения бизнес-процессов предприятий. Рост объемов данных, расширение сетей и увеличение числа подключенных устройств создают различные уязвимости и возможности для кибератак. Каждая организация, независимо от её размера и сферы деятельности, сталкивается с угрозой утечки конфиденциальной информации, которая может повлечь за собой финансовые, имиджевые потери и прочие негативные последствия [1, 2, 3]. Одной из основных задач обеспечения ИБ является работа специалистов с инцидентами. Поэтому разработка сервиса анализа инцидентов с целью повышения эффективности этой работы приобретает особую важность для каждого предприятия. С помощью данного сервиса можно проанализировать произошедшие инциденты для снижения ущерба от возникновения таких нежелательных событий и предотвращения их появления в будущем.

Инцидент информационной безопасности – событие, являющееся следствием одного или нескольких нежелательных или неожиданных событий информационной безопасности, имеющих значительную вероятность компрометации бизнес-операции и создания угрозы информационной безопасности [4]. Инциденты ИБ могут обнаруживаться системами безопасности, например, различными мониторинговыми инструментами. Другим способом выявления может быть аудит ИБ, например, различные проверки системы на соответствие стандартам безопасности. Также об инциденте могут сообщить сотрудники организации, обнаружив его в своей рабочей среде. Инциденты ИБ могут негативно влиять на деятельность предприятия. Для поддержания высокого уровня информационной безопасности необходимо иметь возможность управлять инцидентами.

Управление инцидентами ИБ – это специализированная форма управления инцидентами, основной целью которой является разработка хорошо понятного и предсказуемого реагирования на опасные события и компьютерные вторжения [5, 6]. Для эффективного менеджмента инцидентов ИБ важно применять соответствующие процедуры на всех этапах [7, 8]: обнаружение инцидентов; оценка инцидентов; реагирование на инциденты; активизация защитных мер для предотвращения инцидентов. Регулярные проверки и тестирование процессов информационной системы помогут выявить потенциальные угрозы инцидентов и обеспечить информационную безопасность сети. Такой подход применим к системам и сетям, которые организация использует для управления и мониторинга своей информации, информационных процессов и информационных технологий [9].

Постановка задачи. Цель работы заключается в проектировании и разработке сервиса для автоматизации процессов управления и анализа инцидентов информационной безопасности в металлургической компании. Для достижения поставленной цели необходимо рассмотреть и проанализировать существующие информационные процессы и события, происходящие в информационных системах, с целью увеличения детализации и четкости совершаемых процедур. Кроме того, необходимо рассмотреть показатели эффективности

для управления инцидентами информационной безопасности для совершенствования процессов управления, а также анализ фреймворков и библиотек языка программирования, выбор наиболее подходящих из них. Выше перечисленное позволит в дальнейшем разработать программное приложение, с помощью которого можно отслеживать и анализировать инциденты информационной безопасности предприятия.

Методы исследования. На исследуемом металлургическом предприятии события ИБ могут поступать из различных источников: антивирус Kaspersky endpoint security; межсетевой экран Usergate NGFW; система защиты информации Dallas lock; стандартные средства MS Windows для администрирования. Администраторы информационных систем и систем защиты информации, а также ответственные за информационную безопасность предприятия лица отслеживают и анализируют все события, происходящие в системах. Управление инцидентами на данном предприятии включает в себя следующие процедуры:

1. *Обнаружение инцидента.* Все события, полученные от указанных источников, а также любые другие подозрительные активности обнаруживаются и регистрируются сотрудниками отдела ИБ.

2. *Анализ инцидента.* После обнаружения инцидента специалисты предприятия классифицируют его по типу и уровню критичности. По типу инциденты подразделяются: вредоносное программное обеспечение / уязвимости; несанкционированный доступ; социальная инженерия; отказ в обслуживании (DoS); нарушение внутренних политик/регламентов; утечка / потеря защищаемых данных. Уровень угрозы инцидента может быть критический или некритический.

3. *Реагирование на инцидент.* Некритические инциденты, как правило, решаются быстро. Например, в случае обнаружения антивирусом Kaspersky Endpoint Security на компьютере сотрудника вредоносного программного обеспечения, реагированием может быть следование рекомендациям антивируса. Если инцидент является критическим, то перед его ликвидацией необходимо локализовать затронутые информационные системы и/или персональные компьютеры. Локализация может включать: отключение от компьютерной сети предприятия задетых инцидентом систем и оборудования; остановку различных процессов или служб операционной системы; разграничение прав пользователей. Для ликвидации критического инцидента специалисты ИБ действуют в зависимости от нанесенного урона автоматизированному оборудованию. Например, в случае DoS атаки может быть перенастроена работа межсетевого экрана для фильтрации различных запросов.

4. *Восстановление данных.* В случае, если были задеты какие-либо данные, сотрудники руководствуются инструкциями внутреннего документа предприятия «Политика резервного копирования и восстановления данных». Для восстановления данных используется система Symantec Netbackup.

5. *Расследование инцидента и оценка последствий.* На этапе расследования проводится более глубокое изучение события с целью выявления его причин и механизмов распространения: анализ логов, детальное изучение атаки, исследование уязвимостей в системе, определение возможных участников или источников атаки. Последствия инцидента для предприятия могут отсутствовать, быть незначительными или значительными. По мнению специалистов ИБ, на исследуемом предприятии чаще всего фиксируются инциденты без последствий. Это может означать, что система защиты информации предприятия могла в автоматическом режиме устранить нежелательное событие. Инцидент может привести к минимальным нарушениям в работе ИС и автоматизированного оборудования предприятия, которые не оказали существенного влияния на основные бизнес-процессы, т.е. инцидент имел незначительные последствия для предприятия. Например, небольшая DoS атака не привела к серьезному сбою в оборудовании, либо незначительный объем потерянных данных был быстро восстановлен из резервных копий. Последствия инцидента считаются значительными, если он вызвал серьезные сбои в работе предприятия, привел к крупным

финансовым и/или репутационным потерям. Это может быть полное отключение производственных линий или большая утечка персональных данных.

Эффективность управления инцидентами ИБ оценивается количественными показателями, такими как [10]: общее число инцидентов; среднее фактическое время, затраченное на разрешение инцидента; число и доля инцидентов, обработанных в рамках согласованного времени реакции; средние затраты на полную обработку инцидента; доля инцидентов, закрытых без обращения к специализированным группам поддержки; число и доля инцидентов, разрешенных удаленно. Повышение эффективности процессов управления и анализа инцидентами требует специального программного обеспечения для автоматизации этих процессов и поддержки принятия решений по работе с инцидентами [11, 12]. Сервис анализа инцидентов – это приложение, обеспечивающее удобный доступ к произошедшим инцидентам ИБ и их аналитике. Данный сервис должен иметь функционал добавления, редактирования и удаления инцидентов, а также предоставлять пользователю различные аналитические и статистические данные и визуализировать их с помощью графиков и диаграмм [13-14]. Разработанный сервис позволит предприятию решать инциденты быстрее и снизить риск их появления в будущем. Для разработки сервиса были выбраны язык программирования Python и среда разработки Visual Studio Code.

Для расширения функционала созданного приложения использовались дополнительные фреймворки: *tkinter* – создание графического интерфейса приложения; *PIL* – загрузка и обработка изображений с целью дальнейшего размещения в окнах приложения; *sqlite3* – создание базы данных SQL для хранения информации об инцидентах; *datetime* – отображение даты и времени инцидентов; *ttkthemes* – изменение дизайна интерфейса, построенного на *tkinter*; *matplotlib* – построение различных графиков и диаграмм, анализирующих инциденты.

Обсуждение результатов. Алгоритм разработки сервиса для анализа инцидентов информационной безопасности состоит из следующих шагов:

Шаг 1. Загрузка фреймворков *tkinter*, *sqlite3*, *matplotlib* и сторонней темы библиотеки графического интерфейса *tkinter* для создания современного дизайна приложения.

Шаг 2. Создание и подключение базы данных SQL с помощью функции *create and update database ()* с использованием фреймворка *sqlite3*. Проверка корректности значений базы данных и вызов созданной функции.

Шаг 3. Создание классов *IncidentWindow*, *IncidentDetailWindow*, *MainWindow*, отражающих соответственно окна для добавления и редактирования инцидентов, для просмотра подробной информации об инциденте, главное окно для управления инцидентами и отображения аналитики.

Шаг 4. Создание функций *general_analysis*, *detailed_analysis* и *response_analysis* для формирования аналитических графиков и диаграмм на основе данных об инцидентах, загружаемых из базы данных SQL.

Шаг 5. Создание функций для реализации пользовательского интерфейса при обработке и анализе инцидентов: *toggle_view*, *hide_all*, *add_incident*, *edit_incident*, *delete_incident*, *show_selected_incident_details*, *on_tree_select*.

Шаг 6. Создание процедуры открытия главного окна, т.е. класса *MainWindow*, и запуск цикла данного класса.

Основной функционал приложения сосредоточен в главном окне, где пользователь выбирает требуемую аналитику: общий анализ инцидентов, детальный анализ инцидентов или анализ реагирования на инциденты и их последствия. Общая аналитика показывает суммарное число зафиксированных инцидентов, частоту их возникновения по месяцам и времени суток, распределение по статусам «в работе» и «закрыт». Графики визуально помогают оценить сколько инцидентов еще не завершено, какое количество инцидентов произошло по месяцам года, а также в какое время суток инциденты происходили чаще всего (рис.1).

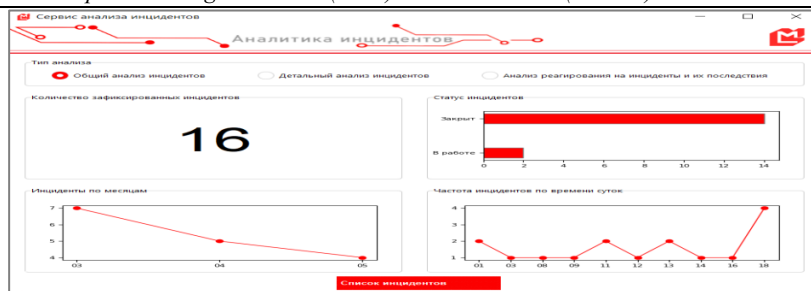


Рис. 1 - Главное окно программного сервиса анализа инцидентов

Fig. 1 - The main window of the incident analysis software service

Кнопка «Список инцидентов» на главном окне открывает другой раздел приложения с таблицей инцидентов ИБ за определенный временной период и командами управления: «Добавить инцидент», «Редактировать инцидент» и «Удалить инцидент». На рис. 2 представлено окно редактирования инцидента.

Рис. 2 - Окно редактирования инцидента

Fig. 2 - Incident editing window

Детальный анализ инцидентов отражает статистику по средствам обнаружения инцидентов, распределение их по степени критичности и по типам (рис.3). На вкладке «Анализ реагирования на инциденты и их последствия», размещены диаграммы «Распределение времени на решение инцидентов», «Количество инцидентов с различными последствиями», а также точечная диаграмма соотношения времени решения инцидента и его последствий.



Рис. 3 - Детальный анализ инцидентов

Fig. 3 - Detailed analysis of incidents

Такая визуализация может помочь в анализе временных затрат на обработку инцидентов и их последствий, а также оценить взаимосвязь уровня последствий инцидентов со временем их устранения.

Вывод. В условиях стремительного развития информационно-коммуникационных технологий информационная безопасность является одной из самых важных составляющих в построении бизнес-процессов. Растущие кибератаки представляют серьезную угрозу для организаций, а инциденты информационной безопасности происходят все чаще. Управление инцидентами информационной безопасности позволяет предприятиям эффективно обнаруживать новые атаки и защищать системы от потенциальных угроз. Анализ произошедших нежелательных и неожиданных событий позволяет повысить уровень эффективности систем управления информационной безопасностью предприятий.

Разработанный сервис способен улучшить управление инцидентами информационной безопасности на предприятии, а также дает возможность проанализировать уже произошедшие инциденты и, как следствие, минимизировать их последствия. Используя данную программную разработку, предприятие может повысить эффективность деятельности в области информационной безопасности.

Библиографический список:

1. Bandari V. Enterprise data security measures: a comparative review of effectiveness and risks across different industries and organization types. *International Journal of Business Intelligence and Big Data Analytics*. 2023; 6(1):1-11.
2. Patterson C.M., Nurse J.R.C., Franqueira V.N.L. Learning from cyber security incidents: A systematic review and future research agenda // *Computers & Security*. – 2023. – Т. 132. – С. 103309.
3. Alarcon J.C.M. Information security: A comprehensive approach to risk management in the digital world // *SCT Proceedings in Interdisciplinary Insights and Innovations*. – 2023. – Т. 1. – С. 84-84.
4. Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Менеджмент инцидентов информационной безопасности. ГОСТ Р ИСО/МЭК ТО 18044-2007. Москва: Стандартинформ, 2009. URL:https://rosgosts.ru/file/gost/01/040/gost_r_iso!mek_to_18044-2007.pdf (20.05.2024).
5. Олейникова А.А., Золотарев В.В. Концепция управления информационной безопасностью на основе цикла непрерывного детектирования и реагирования на инциденты безопасности информации // *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2023. № 5(235). С. 66-81. DOI: 10.18522/2311-3103-2023-5-66-81.
6. Трофимов Д.О., Шепелев М.С., Резниченко С.А. Организация реагирования на инциденты информационной безопасности // *Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки*. 2023. №4(50). С. 148-157. DOI: 10.21822/2073-6185-2023-50-4-148-157.
7. Башарина О.Ю., Буценко Е.В., Похомчикова Е.О., Шильникова И.С. Технология корпоративной защиты персональных данных и конфиденциальной информации // *Современные наукоемкие технологии*. 2024. № 2. С. 8-14. DOI: 10.17513/snt.39924.
8. Солдатов Е.Ю., Селифанов В.В., Кувшинов М.А. Разработка системы контроля инцидентов информационной безопасности // *Безопасность цифровых технологий*. 2023. № 3(110). С. 54-66. DOI: 10.17212/2782-2230-2023-3-54-66.
9. Ehis A. T. Optimization of security information and event management (SIEM) infrastructures, and events correlation/regression analysis for optimal cyber security posture. *Archives of Advanced Engineering Science*. – 2023. – С. 1-10.
10. Рытов М.Ю., Голембиовская О.М., Кондрашова Е.В. Порядок оценки уровня эффективности системы непрерывного противодействия инцидентам информационной безопасности на объекте // *Информация и безопасность*. 2024. Т. 27. № 1. С. 135-142. DOI: 10.36622/1682-7813.2024.27.1.011.
11. Mouratidis H., Islam S., Santos-Olmo A., Sanchez L.E, Ismail M.U. Modelling language for cyber security incident handling for critical infrastructures. *Computers & Security*. 2023;128:103139. DOI: 10.1016/j.cose.2023.103139
12. Naseer H., Desouza K.C., Maynard S.B., Ahmad A. Enabling cybersecurity incident response agility through dynamic capabilities: the role of real-time analytics // *European Journal of Information Systems*. 2024. V. 33. No. 2. P. 200-220. DOI:10.1080/0960085X.2023.2257168.
13. Walter M., Heinrich R., Reussner R. Architecture-based attack path analysis for identifying potential security incidents. *European Conference on Software Architecture*. Cham: Springer Nature Switzerland. 2023; 37-53.
14. Kyriazoglou J. Improving Security Incident and Data Breach Responses // *Information Security Incident and Data Breach Management: A Step-by-Step Approach*. – Berkeley, CA : Apress, 2024. – С. 67-73.

References:

1. Bandari V. Enterprise data security measures: a comparative review of effectiveness and risks across different industries and organization types. *International Journal of Business Intelligence and Big Data Analytics*. 2023; 6(1):1-11.
2. Patterson C.M., Nurse J.R.C., Franqueira V.N.L. Learning from cyber security incidents: A systematic review and future research agenda. *Computers & Security*. 2023;132:103309.
3. Alarcon J.C.M. Information security: A comprehensive approach to risk management in the digital world. *SCT Proceedings in Interdisciplinary Insights and Innovations*. 2023;1:84-84.
4. Information technology. Methods and means of ensuring security. Information security incident management. GOST R ISO/IEC TO 18044-2007. Moscow: Standartinform, 2009. URL: https://ros-gosts.ru/file/gost/01/040/gost_r_iso!mek_to_18044-2007.pdf (accessed: 05/20/2024). (In Russ)
5. Oleinikova A.A., Zolotarev V.V. The concept of information security management based on a cycle of continuous detection and response to information security incidents. *Izvestiya SFU. Technical sciences*. 2023; 5(235):66-81. DOI: 10.18522/2311-3103-2023-5-66-81. (In Russ)

6. Trofimov D.O., Shepelev M.S., Reznichenko S.A. Organization of response to information security incidents. *Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Sciences*. 2023;4(50):148-157. DOI: 10.21822/2073-6185-2023-50-4-148-157. (In Russ)
7. Basharina O.Yu., Butsenko E.V., Pokhomchikova E.O., Shilnikova I.S. Technology of corporate protection of personal data and confidential information. *Modern high-tech technologies*. 2024; 2:8-14. DOI: 10.17513/snt.39924. (In Russ)
8. Soldatov E.Yu., Selifanov V.V., Kuvshinov M.A. Development of an information security incident control system. *Security of digital technologies*. 2023;3(110):54-66. DOI:10.17212/2782-2230-2023-3-54-66.
9. Ehis A. T. Optimization of security information and event management (SIEM) infrastructures, and events correlation/regression analysis for optimal cyber security posture. *Archives of Advanced Engineering Science*. 2023;1-10.
10. Rytov M. Yu., Golembiovskaya O.M., Kondrashova E.V. The procedure for assessing the level of effectiveness of the system of continuous counteraction to information security incidents at the facility. *Information and Security*. 2024;27(1):135-142. DOI: 10.36622/1682-7813.2024.27.1.011. (In Russ)
11. Mouratidis H., Islam S., Santos-Olmo A., Sanchez L.E., Ismail M.U. Modelling language for cyber security incident handling for critical infrastructures. *Computers & Security*. 2023;128:103139. DOI: 10.1016/j.cose.2023.103139.
12. Naseer H., Desouza K.C., Maynard S.B., Ahmad A. Enabling cybersecurity incident response agility through dynamic capabilities: the role of real-time analytics. *European Journal of Information Systems*. 2024;33(2): 200-220. DOI:10.1080/0960085X.2023.2257168.
13. Walter M., Heinrich R., Reussner R. Architecture-based attack path analysis for identifying potential security incidents. *European Conference on Software Architecture. Cham: Springer Nature Switzerland*. 2023; 37-53.
14. Kyriazoglou J. Improving Security Incident and Data Breach Responses. *Information Security Incident and Data Breach Management: A Step-by-Step Approach*. – Berkeley, CA : Apress, 2024; 67-73.

Сведения об авторах:

Ольга Юрьевна Башарина, кандидат технических наук, доцент кафедры бизнес-информатики; basharinaolga@mail.ru

Елена Владимировна Буценко, кандидат экономических наук, доцент кафедры бизнес-информатики; evl@usue.ru

Артем Сергеевич Еремеев, студент, artemdog77@gmail.com

Information about authors:

Olga Yu. Basharina, Dr. Sci. (Eng.), Assoc. Prof.; basharinaolga@mail.ru

Elena V. Butsenko, Dr. Sci. (Econ.), Assoc. Prof.; evl@usue.ru

Artem S. Eremeev, Student; artemdog77@gmail.com

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 19.12.2024.

Одобрена после рецензирования/ Reviced 16.02.2025.

Принята в печать/Accepted for publication 20.05.2025.

**Гибридный метод моделирования систем искусственного интеллекта
для выявления кибератак**

А.И. Дубровина

Донской государственный технический университет,
344002, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является разработка адаптивной системы защиты критической инфраструктуры жизнеобеспечения на основе гибридных ИИ-методов, объединяющих машинное обучение (МО) и обучения с подкреплением. **Метод.** Используется гибридный метод моделирования систем искусственного интеллекта для выявления кибератак. Основой метода является комбинирование обучения с подкреплением и анализа аномалий, что позволяет системе автоматически адаптироваться к новым угрозам в процессе эксплуатации. **Результат.** Предложено внедрение систем искусственного интеллекта на этапах мониторинга, анализ полученных данных и оперативное реагирование по ликвидации угрозы. Система включает разработку гибридных моделей для анализа данных, которая объединяет информацию из внешних источников и журналов событий. Применение системы позволит повысить устойчивость инфраструктуры, снижая уязвимость к угрозам, обеспечивая бесперебойное функционирование в условиях информационной угрозы. **Вывод.** Рассмотрены новые подходы к использованию систем искусственного интеллекта для повышения эффективности защиты критической инфраструктуры объектов. Предложены модели искусственного интеллекта, основанные на машинном обучении, позволяющие обнаруживать за короткое время не только старые угрозы, но и нетипичные сценарии информационных взломов. Алгоритмы прогнозирования применяются для анализа и последующего исследования аномального поведения вредоносной системы, в то время, как глубокое обучение обеспечивает точное заключение по классификации угроз.

Ключевые слова: системный анализ, ИИ, машинное обучение, обучение с подкреплением

Для цитирования: А.И. Дубровина. Гибридный метод моделирования систем искусственного интеллекта для выявления кибератак. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025; 52(2):81-89. DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-2-81-89

A hybrid method for modeling artificial intelligence systems to detect cyberattacks

A.I. Dubrovina

Don State Technical University
1 Gagarina Square, Rostov-on-Don 344002, Russia

Abstract. Objective. The aim of the research is to develop an adaptive system for protecting critical life support infrastructure based on hybrid AI methods that combine machine learning (ML) and reinforcement learning. **Method.** A hybrid method of modeling artificial intelligence systems to detect cyber attacks is used. The basis of the method is a combination of reinforcement learning and anomaly analysis, which allows the system to automatically adapt to new threats. **Result.** It is proposed to implement artificial intelligence systems at the stages of monitoring, analysis of the received data and prompt response to eliminate the threat. The system includes the development of hybrid models for data analysis, which combines information from external sources and event logs. The use of the system will increase the stability of the infrastructure, reduce

vulnerability to threats, and ensure uninterrupted operation in the conditions of an information threat. **Conclusion.** New approaches to the use of artificial intelligence systems are considered. Artificial intelligence models based on machine learning are proposed, allowing for the detection of not only old threats but also atypical scenarios of information hacks in a short time. Predictive algorithms are used to analyze the abnormal behavior of the malicious system, and deep learning provides accurate conclusions about threat classification.

Keywords: system analysis, AI, machine learning, reinforcement learning

For citation: A.I. Dubrovina. A hybrid method for modeling artificial intelligence systems to detect cyberattacks. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2025;52(2):81-89. (In Russ) DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-2-81-89

Введение. Критическая инфраструктура жизнеобеспечения (например, энергосети и системы водоснабжения) является мишенью для целевых кибератак, способных привести к катастрофическим последствиям. Традиционные методы защиты, такие как сигнатурный анализ, не справляются с обнаружением новых и атипичных угроз, что требует внедрения адаптивных технологий на основе искусственного интеллекта (ИИ). Управление ИИ-системами позволяет расширить нахождение угроз с помощью их мониторинга и защиты инфраструктуры, обеспечивая устойчивость, целостность, надежность и безопасность функционирования критических объектов. По данным ICS-CERT [1], 34% атак на промышленные системы в 2022 г. были направлены на объекты ЖКХ, что приводит к перебоям в работе и угрозе жизни населения [2].

Актуальность исследования обусловлена недостатком эффективности сигнатурных методов; ростом целевых атак; жесткими требованиями к времени реакции [3]. Это требует разработки более интеллектуальных систем обнаружения угроз.

Постановка задачи. Целью исследования является разработка адаптивной системы защиты критической инфраструктуры жизнеобеспечения на основе гибридных ИИ-методов, объединяющих машинное обучение (МО) и обучения с подкреплением. Разработка ИИ-системы направлена на оптимизацию, адаптацию и повышение эффективности модели, делая её эффективной в реальных условиях. Для достижения цели исследования были поставлены задачи: осуществить обзор современных методов информационной безопасности (ИБ) по обнаружению кибератак; адаптировать методологию обучения с подкреплением для выявления аномалий на инфраструктуре жизнеобеспечения; разработать архитектуру ИИ-агента, использующего методы машинного обучения и RL для выявления и предотвращения атак; оценить эффективность созданной модели [6].

Научная новизна результатов исследования заключается в разработке гибридной ИИ-архитектуры, сочетающей RL и глубокие нейросети для классификации аномалий (объединяющая RL для адаптации и CNN), а также в создании механизма автоматической коррекции стратегии на основе ложных срабатываний. Предложенная архитектура ИИ-агента сочетает RL для динамической адаптации к новым угрозам и глубокие нейросети (CNN) для классификации аномалий. Эксперименты в симуляционной среде подтвердили эффективность подхода: точность обнаружения атак достигла 92%, а число ложных срабатываний сократилось на 40%. Результаты демонстрируют потенциал гибридных методов для обеспечения устойчивости критической инфраструктуры в условиях эволюции киберугроз [4,5]. Предложенная модель объединяет эти подходы в единое адаптивное решение [5]. Это делает её универсальной и более эффективной в условиях реальных угроз.

Методы исследования. В ходе исследования проведён обзор и анализ методов моделирования ИИ-системы для выявления угроз на системы критически-важной структуры жизнеобеспечения. Были изучены труды Shengjie Xu, Yi Qian и Rose Qingyang Hu, а также работы Ю. Лю и Шелухина и Зегжды. Предлагается разработать и обучить ИИ-систему; на основе исследования Ю. Лю реализовать метод Deep Q-Learning или Actor-

Critic для создания динамической адаптации к новым угрозам; разработать систему обнаружения аномалий: внедрение гибридного метода анализа на основе Шелухина и Зегжды [7]; протестировать и проанализировать результаты: провести серию тестов с разными типами атак, такие как DDoS, атаки с подменой данных и фишинговые атаки.

Современные методы обеспечения безопасности в системах управления жизнеобеспечения крайне важны для предотвращения кибератак, поэтому были рассмотрены исследования [8]. Концепции и проблемы ИБ, описанные в [8], возникают при внедрении интеллектуальных сетевых систем. Анализ угроз, с которыми сталкиваются такие системы, говорит о необходимости внедрения комплексных методов защиты, включая мониторинг сетевой активности, обнаружение аномалий и применение обучаемых ИИ-моделей для автоматического выявления вторжений. Подходы, представленные в [8], обосновывают целесообразность применения глубокого обучения и методов анализа при мониторинге большого объёма данных, что способствует существенному повышению эффективности обнаружения угроз в реальном времени.

Для распознавания кибератак эффективно применение обучение с подкреплением (RL). Этот метод подробно описан в [9]. Преимуществами RL является в способности обучения агента делать правильный выбор в сложных и динамических сценариях при нарушении целостности системы инфраструктуры жизнеобеспечения. RL-агенты обучаются и адаптируются к новым угрозам в процессе использования на объекте, что позволяет разработать гибкую систему, которая будет реагировать на неизвестные виды атак. Здесь описаны примеры использования библиотек PyTorch, для разработки и тестирования RL-агентов для облегчения исследования подходов к построению ИИ-систем. Для обнаружения аномальных паттернов в сетевой активности инфраструктуры жизнеобеспечения можно применять такие подходы, как Deep Q-Learning, Policy Gradient и Actor-Critic. В области ИБ была рассмотрена работа [10], в которой исследуется применение интеллектуальных методов для обеспечения ИБ. В книге анализируются методы защиты и современные подходы по решению с помощью машинного обучения. Авторы подчеркивают повышение эффективности обнаружения кибератак при использовании гибридных методов.

Для реализации методов глубокого обучения, изложенных в [3], необходимо рассмотреть конкретные эффективные модели, их строение, условия использования и методы оптимизации. В [4] подробно рассматриваются основы свёрточных операций, мотивация их использования в нейронных сетях, а также такие ключевые компоненты, как пулинг и различные варианты свёрток, применяемые на практике. Авторы объясняют, как свёрточные сети могут быть адаптированы для обработки данных с разной размерностью и предлагают методы повышения эффективности их работы. Обсуждается влияние нейробиологических принципов на развитие глубокого обучения и роль свёрточных сетей в истории этой области. Разработка гибридных моделей используется для предсказания и предотвращения атак, позволяя выстроить многоуровневую систему защиты, которая сможет адаптироваться к изменениям угроз в критически-важной инфраструктуре жизнеобеспечения [11]. В данной работе использованы методы машинного обучения, статистического анализа и моделирования атак, направленные на разработку гибридной ИИ-системы для обнаружения кибератак в системах жизнеобеспечения. Методы машинного обучения и анализа данных включают:

- обучение с подкреплением: RL-агенты обучаются на данных сетевого трафика и системных журналов, адаптируясь к новым атакам. RL позволяет агенту обучаться на основе наградной функции, минимизируя число ложных срабатываний;
- глубокие нейросети (Deep Learning, DL): используют конволюционные нейросети (CNN), анализируют временные ряды сетевого трафика, классифицируют и определяют новые атаки [12];

- анализ аномалий (Anomaly Detection) включает выявление нестандартного поведения: использует кластеризационные методы (K-Means) для поиска аномальных паттернов.

Методы моделирования атак и тестирования содержат:

- симуляционную среду тестирования: в ней создается виртуализированная копия инфраструктуры критически важных объектов, возможно моделирование атак (DDoS, подмена данных, фишинг, вредоносное ПО);
- оценка эффективности системы представляет собой время и точность обнаружения атаки: необходимо верно подобрать метрику машинного обучения (Precision, Recall, F1-score, ROC-AUC) [13];
- объединение сигнатурных, эвристических и аномалийных методов для более точного выявления атак;
- автоматическая коррекция стратегии агента на основе ложных срабатываний.

В качестве объектов исследования приняты энергетические системы – атаки на SCADA-системы, приводящие к отключениям; система водоснабжения – инъекции вредоносного кода, нарушающие работу насосных станций; транспорт – DDoS-атаки на системы управления движением. Для обучения моделей использовались датасеты на основе реальных инцидентов (данные сетевого трафика с метками аномалий из репозитория CICIDS2017).

Методы исследования включают обучение с подкреплением, глубокие нейросети, анализ аномалий, моделирование атак в симуляционной среде, оценку точности модели. Такой подход позволяет создать адаптивную систему обнаружения вторжений, которая способна выявлять даже неизвестные угрозы и минимизировать ложные срабатывания.

Разработка алгоритма тестирования. Симуляционная среда Cyber Attack Env представляет собой виртуализированную копию системы управления критической инфраструктурой, где моделируются возможные сценарии атак и их влияние на инфраструктуру [14]. Среда содержит ключевые параметры, такие как: уровень нагрузки на систему; типы атак (например, DDoS, внедрение вредоносного кода); метрики оценки стабильности системы. Симуляционная среда Cyber Attack Env позволяет безопасно проверять эффективность ИИ-системы, не подвергая реальные объекты инфраструктуры риску.

Система включает три уровня: мониторинг – сбор данных сетевого трафика и журналов событий; анализ – гибридная модель (RL + CNN) для обнаружения аномалий; реагирование – автоматическая блокировка угроз и корректировка стратегии [15]. Главный компонент, который взаимодействует со средой – DQNAgent (агент глубокого обучения на основе Deep Q-Network). Он оптимизирует стратегию за счёт метода обучения с подкреплением. Оценивает ценность действий агента в различных состояниях QNetwork – нейросетевая архитектура (рис.1).



Рис.1 – Взаимодействие агента с виртуальной средой
Fig.1 – Interaction of the agent with the virtual environment

После создания симуляционной среды была разработана ИИ-системы и её обучение по методологиям, описанных авторами [16] (рис. 2).

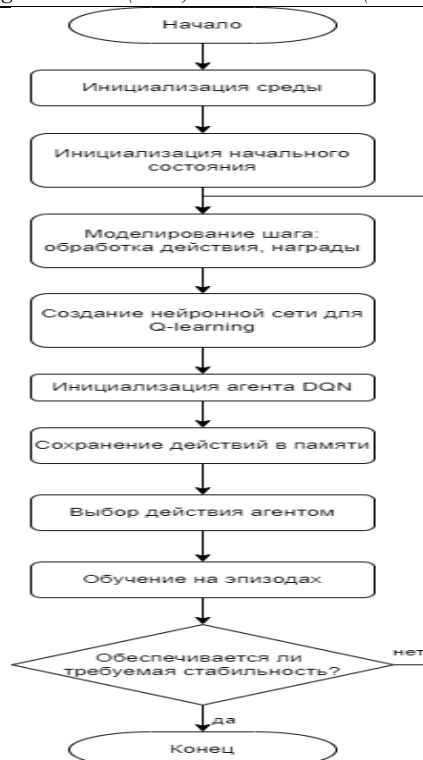


Рис. 2 – Алгоритм обучения программы
Fig. 2 – Program training algorithm

Блок-схема описывает итеративный процесс обучения агента DQN для выявления атак. Алгоритм оптимизирует стратегию выбора действий на основе опыта. Сначала выполняется инициализация среды, в которой будет обучаться агент, а затем задаётся начальное состояние системы, определяющее исходные параметры работы модели. В процессе обучения агент взаимодействует со средой, совершая действия и получая награду в зависимости от их эффективности. Для оптимизации обучения создаётся нейросетевая модель Q-learning, которая является основой DQN-агента [17]. После инициализации агент начинает сохранять свои действия в памяти, что позволяет анализировать и корректировать стратегию. На основе накопленного опыта он выбирает наиболее эффективные действия, улучшая способность к обнаружению угроз. В ходе многократных эпизодов обучения агент адаптируется, оптимизируя стратегию взаимодействия со средой.

Алгоритм обучения агента заключался в следующих моментах [18]: инициализации симуляционной среды CyberAttackEnv; генерации состояний системы, в которую входили нагрузка и тип атаки; выбора действия агентом блокировки или пропуска на основе Q-значений. Производилась корректировка наградной функции: награда +1 за предотвращение атаки; штраф -1 за пропуск угрозы или ложное срабатывание; обновление буфера памяти и нейросетевой модели для лучшего обучения. Из корректировочных коэффициентов выделяются Gamma, равная 0.9, обозначающая учёт долгосрочных последствий действий, и Epsilon_decay, равная 0.995, обозначающая баланс между исследованием и эксплуатацией. Разработка алгоритма ИИ-системы, направленной на обнаружение кибератак, основана на обучении с подкреплением (Reinforcement Learning, RL) [2], анализе аномалий. и обнаружения аномалий. этапе обучения модели RL разработан алгоритм обучения агента с использованием библиотеки PyTorch, а также определена наградная функция, обеспечивающая корректное поведение системы. Для повышения точности обнаружения угроз внедрён гибридный подход, в котором RL дополняется методами анализа сетевых аномалий, такими как кластеризация. Заключительный этап включал тестирование и оптимизацию алгоритма: проведены симуляции с различными сценариями атак, а также выполнена корректировка параметров модели и алгоритма обучения для достижения наилучших результатов (табл. 1) [19].

Таблица 1. Вывод данных ИИ-агента

Table 1. AI agent data output

№ эпизода Episode	Общая награда Overall award	№ шага No Step.	Состояние State	Действие Action	Награда Reward
1	-2	1	[0.37, 0.95, 0.73, 0.6, 0.16, 0.16, 0.06, 0.87, 0.6, 0.71]	1	-1
		2	[0.97, 0.83, 0.21, 0.18, 0.18, 0.3, 0.52, 0.43, 0.29, 0.61]	1	1
		10	[0.11, 0.03, 0.64, 0.31, 0.51, 0.91, 0.25, 0.41, 0.76, 0.23]	1	-1
2	0	1	[0.29, 0.16, 0.93, 0.81, 0.63, 0.87, 0.8, 0.19, 0.89, 0.54]	1	-1
		2	[0.9, 0.32, 0.11, 0.23, 0.43, 0.82, 0.86, 0.01, 0.51, 0.42]	0	-1
		10	[0.16, 0.55, 0.69, 0.65, 0.22, 0.71, 0.24, 0.33, 0.75, 0.65]	0	-1
3	-2	1	[0.66, 0.57, 0.09, 0.37, 0.27, 0.24, 0.97, 0.39, 0.89, 0.63]	1	-1
		2	[0.22, 0.88, 0.04, 0.34, 0.7, 0.5, 0.41, 0.7, 0.94, 0.12]	1	-1
		10	[0.93, 0.69, 0.64, 0.43, 0.17, 0.7, 0.43, 0.23, 0.86, 0.79]	1	1

При выводе графика можно увидеть общую награду за каждый эпизод в процессе обучения агента в среде моделирования кибератак (рис. 3).



Рис. 3 – График ИИ-агента

Fig. 3 – AI agent graph

Награда назначается следующим образом: при выборе агентом действие «атака» (действие с индексом 1), и при этом среднее состояние системы выше 0.5, агент получает штраф -1, иначе он получает положительную награду +1. Награда за каждый шаг складывается, и суммарное значение за все шаги в рамках одного эпизода становится общей наградой за эпизод. Горизонтальная ось представлена номером эпизода (1-3 эпизоды). Вертикальная ось показывает общую награду, полученную агентом за каждый эпизод. Точки на графике соответствуют общему значению награды за конкретный эпизод.

Согласно полученным результатам можно сделать следующие выводы: эпизод 1: -2 – награда отрицательная: это указывает на то, что система совершила несколько ошибок, что приводило к штрафам; эпизод 2: награда 0 – агент сбалансировал свои действия, что привело к нулевому результату; эпизод 3: -2 – агент не улучшил свою стратегию по сравнению с первым эпизодом [7].

Обсуждение результатов. Обучение агента на начальных этапах показало неудовлетворительные результаты, поэтому для достижения более эффективного поведения системы необходимо скорректировать подход к обучению и внести изменения в стратегию агента. Прежде всего, ключевую роль в обучении играет наградная функция, которая задаёт мотивацию для агента. Чтобы сделать её более адаптивной, можно отказаться от фиксированной шкалы, где за правильное действие агент получает +1, а за неправильное -1. Вместо этого следует вводить градуированную систему наград и штрафов, зависящую от степени риска для системы. Например, если агент пропускает атаку с низким уровнем угрозы, штраф может быть минимальным, но если атака приводит к критическим сбоям, штраф

должен быть значительно выше. Аналогично, награда за предотвращение угрозы может варьироваться: минимальная награда за устранение незначительной проблемы и максимальная за предотвращение высокорискованных ситуаций [20].

Другим важным аспектом является параметр `epsilon_decay`, определяющий скорость уменьшения вероятности случайных действий агента. На начальном этапе обучения случайные действия помогают агенту исследовать среду и находить оптимальные стратегии, поэтому снижение `epsilon_decay` позволит агенту дольше находиться в фазе исследования. Это особенно важно в сложных средах, где важные паттерны поведения не всегда очевидны с первых шагов обучения. Увеличение коэффициента дисконтирования `gamma` (обычно находящегося в диапазоне от 0 до 1) будет способствовать обучению агента учитывать долгосрочные последствия своих действий. Например, если агент будет выбирать действия, которые сейчас приносят небольшую выгоду, но в будущем могут привести к серьёзным последствиям, его стратегия окажется неэффективной. Более высокий `gamma` позволяет агенту концентрироваться на поиске стратегий, которые приносят максимальную выгоду в долгосрочной перспективе, даже если в краткосрочном периоде действия кажутся менее выгодными. Для улучшения памяти и анализа предыдущего опыта следует увеличить размер буфера памяти. Буфер памяти используется для хранения состояний, действий, наград и последствий, которые агент пережил за время обучения. Если объём буфера недостаточен, агент теряет возможность учиться на большом количестве примеров, что ограничивает его способность корректно реагировать на сложные ситуации. Увеличение размера буфера позволит агенту опираться на более полный набор данных, что, в свою очередь, повысит его способность находить оптимальные решения.

Наконец, важным шагом для повышения точности в сложных сценариях является увеличение количества нейронов в архитектуре нейронной сети, используемой агентом. Нейронная сеть отвечает за обработку входных данных и принятие решений, и увеличение её сложности позволяет выявлять более тонкие и сложные паттерны в данных. Например, при обработке данных о сетевом трафике с высоким уровнем шума большой объём нейронов может помочь сети различать нормальные и аномальные состояния системы, повышая точность обнаружения атак [3]. Эти изменения позволили агенту правильно реагировать на атаки, что привело к более высоким значениям награды (табл. 2 и рис. 4) [9].

Таблица 2. Вывод данных обновленного ИИ-агента

Table 2. Output of updated AI agent data

№ эпизода Episode	Общая награда Overall award	№ шага Step No.	Состояние State	Действие Action	Награда Reward
1	2	1	[0.37, 0.95, 0.73, 0.6, 0.16, 0.16, 0.06, 0.87, 0.6, 0.71]	1	1
		2	[0.97, 0.83, 0.21, 0.18, 0.18, 0.3, 0.52, 0.43, 0.29, 0.61]	1	1
		10	[0.11, 0.03, 0.64, 0.31, 0.51, 0.91, 0.25, 0.41, 0.76, 0.23]	1	0
2	1	1	[0.29, 0.16, 0.93, 0.81, 0.63, 0.87, 0.8, 0.19, 0.89, 0.54]	1	1
		2	[0.9, 0.32, 0.11, 0.23, 0.43, 0.82, 0.86, 0.01, 0.51, 0.42]	0	0
		10	[0.16, 0.55, 0.69, 0.65, 0.22, 0.71, 0.24, 0.33, 0.75, 0.65]	0	0
3	3	1	[0.66, 0.57, 0.09, 0.37, 0.27, 0.24, 0.97, 0.39, 0.89, 0.63]	1	1
		2	[0.22, 0.88, 0.04, 0.34, 0.7, 0.5, 0.41, 0.7, 0.94, 0.12]	1	1
		10	[0.93, 0.69, 0.64, 0.43, 0.17, 0.7, 0.43, 0.23, 0.86, 0.79]		



Рис. 4 – График обновлённого ИИ-агента
Fig. 4 – Graph of the updated AI agent

В улучшенном случае: эпизод 1: 2 – награда положительная: система совершила правильный выбор, что привело к наградам; эпизод 2: награда составила 1 – агент ухудшил результат по сравнению с эпизодом 1, но его ответы суммарно составили положительный результат; эпизод 3: 3 – агент улучшил свою стратегию и в данном эпизоде стал лучше по сравнению с 1 и 2 эпизодами. Коррекция наградной функции, улучшение дополнительных параметров для обучения, расширение буфера памяти, усложнение нейросетевой архитектуры позволили агенту эффективнее реагировать на угрозы. Эксперименты проводились в симуляционной среде с тремя типами атак, такие как DDoS, подмена данных и фишинг (табл.3). Введение градуированной наградной функции снизило число ложных срабатываний, а увеличение размера буфера памяти тем самым улучшило адаптацию к новым видам угроз.

Таблица 3. Вывод данных обновленного ИИ-агента

Table 3. Output of updated AI agent data

Метрика Metric	Базовая модель Base Model	Оптимизированная модель Optimized Model
Precision	0.78	0.92
Recall	0.65	0.88
F1-score	0.71	0.90
Ложные срабатывания/час False alarms	12	7

Вывод. Предложенная гибридная система демонстрирует высокую эффективность в защите критической инфраструктуры за счёт сочетания RL и глубокого обучения. Дальнейшее исследование будет направлено на интеграцию системы с реальными объектами и расширение поддерживаемых типов атак. При проведении анализа и создании можно сделать вывод, что моделирование системы ИИ для выявления кибератак на систему управления инфраструктурой жизнеобеспечения требует интеграции передовых методов, таких как обучение с подкреплением и гибридные подходы к обнаружению угроз. Использование интеллектуальных технологий для мониторинга и анализа сетевой активности позволяет создавать адаптивные и устойчивые к атакам системы, обеспечивающие высокий уровень информационной безопасности.

Библиографический список:

1. Шелухин В.В., Зегжда Д.П. Интеллектуальные технологии информационной безопасности. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021. 320 с.
2. Лю Ю. Обучение с подкреплением на PyTorch: Сборник рецептов. СПб.: Питер, 2020. 400 с.
3. Xu S., Qian Y., Hu R.Q. Cybersecurity in Intelligent Networking Systems. New Jersey: Wiley-IEEE Press, 2019. 368 p.
4. Goodfellow I., et al. Deep learning. MIT press, 2016. 800 p.
5. Alavizadeh H., et al. Deep Reinforcement Learning for Cybersecurity: A Comprehensive Review. IEEE Access, 2023, vol. 11, p. 12392-12416.
6. Sutton R.S., Barto A.G. Reinforcement Learning: An Introduction. 2nd ed. Cambridge: MIT Press, 2018. 552 p.
7. Kaspersky K., et al. Advanced Persistent Threats: Detection, Analysis, and Protection. Berlin: Springer, 2020. 278 p.
8. Гаврилов А.В., Петренко С.А. Машинное обучение в задачах кибербезопасности. М.: ДМК Пресс, 2022. 192 с.

9. Silver D., et al. Mastering the game of Go with deep neural networks and tree search. *Nature*, 2016, vol. 529, p. 484-489. DOI: 10.1038/nature16961
10. Липаев В.В. Защита критической инфраструктуры от кибератак. СПб.: Лань, 2021. 245 с.
11. Mnih V., et al. Human-level control through deep reinforcement learning. *Nature*, 2015; 518:529-533.
12. Осипов Д.С. Нейронные сети для анализа сетевого трафика. М.: Инфра-Инженерия, 2023. 168 с.
13. Carlini N., Wagner D. Adversarial Examples: Attacks and Defenses. arXiv:1802.00420, 2019.
14. Миронов А.А., Соколова Е.В. Глубокое обучение в защите данных. Новосибирск: НГУ, 2022. 210 с.
15. LeCun Y., Bengio Y., Hinton G. Deep learning. *Nature*, 2015, vol. 521, p. 436-444.
16. Шнайер Б. Прикладная криптография. М.: Триумф, 2020. 816 с.
17. Papernot N., et al. Practical Black-Box Attacks Against Machine Learning. *ACM CCS*, 2017, p. 506-519.
18. Tanenbaum A.S., Wetherall D. *Computer Networks*. 6th ed. New Jersey: Pearson, 2021. 960 p.
19. Крутов А.Н., Белов А.И. Искусственный интеллект в энергетике. М.: Энергоатомиздат, 2023. 304 с.
20. Madry A., et al. Towards Deep Learning Models Resistant to Adversarial Attacks. *ICLR*, 2018.

References:

1. Shelukhin V.V., Zeghda D.P. *Intelligent Technologies for Information Security*. Moscow: MSTU Publishing House, 2021. 320 p. (In Russ.)
2. Liu Y. *Reinforcement Learning with PyTorch: A Cookbook*. St. Petersburg: Peter, 2020. 400 p. (In Russ.)
3. Xu S., et al. *Cybersecurity in Intelligent Networking Systems*. New Jersey: Wiley-IEEE Press, 2019. 368 p.
4. Goodfellow I., et al. *Deep Learning*. MIT Press, 2016. 800 p.
5. Alavizadeh H., et al. Deep Reinforcement Learning for Cybersecurity: *A Comprehensive Review*. *IEEE Access*, 2023;11:12392-12416.
6. Sutton R.S., Barto A.G. *Reinforcement Learning: An Introduction*. 2nd ed. Cambridge: MIT Press, 2018. 552 p.
7. Kaspersky K., et al. *Advanced Persistent Threats: Detection, Analysis, and Protection*. Berlin: Springer, 2020. 278 p.
8. Gavrilov A.V., Petrenko S.A. *Machine Learning in Cybersecurity Tasks*. Moscow:DMK Press, 2022. 192p. (In Russ.)
9. Silver D., et al. Mastering the game of Go with deep neural networks and tree search. *Nature*, 2016; 529: 484-489.
10. Lipaev V.V. *Protection of Critical Infrastructure from Cyber Attacks*. St.Petersburg: Lan, 2021;245(In Russ.)
11. Mnih V., et al. Human-level control through deep reinforcement learning. *Nature*, 2015; 518:529-533.
12. Osipov D.S. *Neural Networks for Network Traffic Analysis*. Moscow: Infra-Engineering, 2023. 168 p. (In Russ.)
13. Carlini N., Wagner D. Adversarial Examples: Attacks and Defenses. arXiv:1802.00420, 2019.
14. Mironov A.A., Sokolova E.V. *Deep Learning in Data Protection*. Novosibirsk: NSU, 2022. 210 p.(In Russ.)
15. LeCun Y., Bengio Y., Hinton G. Deep learning. *Nature*, 2015;521:436-444.
16. Schneier B. *Applied Cryptography*. Moscow: Triumph, 2020. 816 p. (In Russ.)
17. Papernot N., et al. Practical Black-Box Attacks Against Machine Learning. *ACM CCS*, 2017; 506-519.
18. Tanenbaum A.S., Wetherall D. *Computer Networks*. 6th ed. New Jersey: Pearson, 2021. 960 p.
19. Krutov A.N., Belov A.I. *Artificial Intelligence in Energy*. Moscow:Energoatomizdat, 2023.304 p.(In Russ.)
20. Madry A., et al. Towards Deep Learning Models Resistant to Adversarial Attacks. *ICLR*, 2018.

Сведения об авторе:

Ангелина Игоревна Дубровина, доцент, ministrelia69@yandex.ru, ORCID: 0009-0005-8562-9389

Information about author:

Angelina I. Dubrovina, Assoc. Prof., ministrelia69@yandex.ru, ORCID: 0009-0005-8562-9389

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 22.04.2025.

Одобрена после рецензирования/ Revised 30.05.2025.

Принята в печать/Accepted for publication 04.06.2025.

Новый метод определения характеристик блочных алгоритмов

В.А. Егунов

Волгоградский государственный технический университет,
400005, г.Волгоград, пр.им. Ленина, 28, Россия

Резюме. Цель. В области высокопроизводительных вычислений большое значение имеет оптимизация программных систем под конкретные вычислительные архитектуры. Целью исследования является совершенствование методов определения параметров блочных алгоритмов. **Метод.** Исследование основано на методологии компьютерного моделирования и автоматизированного проектирования в технике и технологиях, включая постановку, формализацию и типизацию проектных процедур и алгоритмов. **Результат.** Предложен аналитический подход к повышению эффективности проектируемых программных систем, в рамках которого рассмотрен метод определения параметров блочных алгоритмов. Преимуществом данного метода является возможность его реализации на основе статического анализа исходного кода программы на начальных этапах проектирования, полученные параметры могут быть использованы в процессе оптимизации. Проведены вычислительные эксперименты, подтверждающие эффективность предложенного метода. **Вывод.** Предложенный метод позволяет определять размеры блоков, при которых на определенном уровне кеш-памяти не будет генерироваться кеш-промахов или количество этих промахов будет оставаться на приемлемом уровне. Данный метод может использоваться на начальных этапах проектирования программных систем, не прибегая к динамическому анализу приложения, включающему в себя этапы получения исполняемого кода приложения и анализ его с помощью специальных приложений, в данном случае используется статический анализ исходного кода программы.

Ключевые слова: кеш-память, оптимизация, эффективность программного обеспечения, кеш-промах, кеш-попадание, ассоциативность кеш-памяти, блочный алгоритм, проектирование программ

Для цитирования: В.А. Егунов. Новый метод определения характеристик блочных алгоритмов. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025;52(2):90-97. DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-2-90-97

A new method for determining the characteristics of block algorithms

V.A. Egunov

Volgograd State Technical University,
28 Lenin Ave., Volgograd 400005, Russia

Abstract. Objective. In the field of high-performance computing, optimization of software systems for specific computing architectures is of great importance. The aim of the study is to improve the methods for determining the parameters of block algorithms. **Method.** The study is based on the methodology of computer modeling and automated design in engineering and technology, including the formulation, formalization and typification of design procedures and algorithms. **Result.** An analytical approach to improving the efficiency of designed software systems is proposed, within the framework of which a method for determining the parameters of block algorithms is considered. The advantage of this method is the possibility of its implementation based on static analysis of the source code of the program at the initial stages of design; the obtained parameters can be used in the optimization process. Computational experiments confirming the efficiency of the proposed method were conducted. **Conclusion.** The proposed method allows

determining the block sizes at which no cache misses will be generated at a certain level of cache memory or the number of these misses will remain at an acceptable level. The method can be used at the initial stages of designing software systems without resorting to dynamic analysis of the application; in this case, static analysis of the program source code is used.

Keywords: cache memory, optimization, software efficiency, cache miss, cache hit, cache associativity, block algorithm, program design

For citation: V.A. Egunov. A new method for determining the characteristics of block algorithms. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2025; 52(2):90-97. (In Russ) DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-2-90-97

Введение. Разработке эффективных программных систем (ПС) уделяется большое внимание исследователей. В течение последних десятилетий активно ведутся исследования в области создания новых методов проектирования и оптимизации ПС. Особое внимание уделяется этому вопросу в связи с ростом высокопроизводительных вычислений (ВПВ), которые связывают с обработкой больших массивов информации и ростом объемов вычислений. Примером ПС, непрерывно подвергающимся оптимизации на протяжении последних десятилетий, являются различные реализации интерфейса Basic Linear Algebra Subroutines (BLAS), который стал стандартом интерфейса библиотек, реализующих операции линейной алгебры [1,2]. Существует множество реализаций BLAS. Некоторые из них распространяются как библиотеки с открытым исходным кодом, например, OpenBLAS [3]. Другие распространяются в виде проприетарных библиотек, например IntelMKL [4]. Операции линейной алгебры можно считать классическим примером того, как можно значительно повысить эффективность ПС, снизив время вычислений, одновременно снижая требования к производительности вычислительной системы (ВС), за счет применения блочной оптимизации. Суть данного метода оптимизации заключается в разбиении большой матрицы на блоки (подматрицы) таким образом, чтобы все необходимые для выполнения очередного этапа преобразования блоки помещались в кеш-память. Данный метод показывает хорошую эффективность, однако, для его применения необходимо решить ряд проблем, связанных с преобразованием исходного алгоритма.

Постановка задачи. В области ВПВ большое значение имеет оптимизация ПС под конкретные вычислительные архитектуры. Существуют различные подходы решения данной задачи. Одним из подходов является разработка версий ПС, оптимизированных для конкретных вычислительных архитектур, как это сделано, например, в Intel MKL. Другим подходом к решению данной задачи является настройка ПС для получения наилучшей реализации на конкретной вычислительной архитектуре. Процедура настройки заключается в поиске наилучшей комбинации оптимизационных настроек или параметров. Цель подбора оптимального набора параметров – получение максимально эффективной ПС [5, 6].

Параметризованные алгоритмы при этом должны проектироваться таким образом, чтобы изменение параметров не влияло на логику работы ПС, т.е. ПС должна выдавать одни и те же результаты при задании различных параметров на одинаковых наборах входных данных. Различные наборы параметров должны влиять только на эффективность получаемой ПС в целевой ВС.

Предполагается ручной и автоматический варианты настройки алгоритмов. Ручная настройка является традиционным, известным и широко используемым методом оптимизации. Суть метода заключается в том, что специалист в области ВПВ подбирает параметры предложенных алгоритмов, создавая для каждой целевой архитектуры новую реализацию программы. Качество полученной программы и время, потраченное на ее разработку, зависят от квалификации специалиста. Автоматическая настройка представляет собой процесс, когда библиотека оптимизирует сама себя [7]. Примером может служить библиотека Automatically Tuned Linear Algebra Software (ATLAS), в которой для создания вычислитель-

ных ядер используется процедура итеративной компиляции с поиском оптимальных параметров настройки алгоритмов. Известны работы по разработке математических моделей и методов, которые применяются в процессе оптимизации ПС. В качестве примера модели, используемой для настройки параметров алгоритмов, можно привести модель целевой архитектурной платформы, описанной в работе [8], позволяющая вычислять значения параметров вместо перебора их значений и тестирования полученных программ на целевых архитектурах. Также необходимо отметить работы [9-11], на которые в определенной степени опирается настоящее исследование, в которых описаны методы повышения эффективности подсистемы памяти и векторизации вычислений в процессе получения эффективных реализаций BLAS операций.

Важным приемом оптимизации ПС является разработка блочных алгоритмов реализации известных преобразований, примером здесь может служить матричное умножение. Размер блока необходимо выбирать таким образом, чтобы минимизировать количество кеш-промахов в процессе выполнения вычислений. И важным здесь является следующий вопрос: «Какой максимальный размер блока, при котором генерируются только «холодные» промахи и не происходит вытеснения строк из кеш-памяти?». Ответ на данный вопрос является крайне важным для задания значений параметров блочных алгоритмов, которые могут меняться в зависимости от характеристики целевой ВС.

Методы исследования. В современных микропроцессорах (МП) кеш-память имеет множественно-ассоциативную организацию, при которой кеш-память делится на несколько банков, каждый из которых работает как кеш с прямым отображением. Строка основной памяти может быть отображена не в одну конкретную строку кеша, а в некоторое множество строк, т.е. в один из банков. При последовательном обращении по адресам основной памяти, такая организация кеш-памяти приводит к равномерному заполнению множеств кеша. Однако, при использовании других шаблонов доступа, ситуация меняется. Рассмотрим общий случай регулярного доступа к данным, которые не расположены в памяти непрерывно (рис.1).

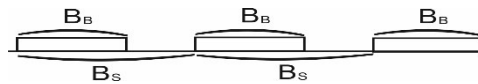


Рис. 1 – Схема расположения данных
 Fig. 1 – Data layout diagram

Данные расположены регулярно, но не непрерывно: длина каждого шаблона составляет B_s байт; из каждого шаблона считывается B_b байт. В данном случае заполнение кеш-памяти не будет равномерным и будет зависеть от соотношений характеристик шаблона и кеш-памяти.

Пусть характеристики шаблона, выраженные в единицах кеш-линий, имеют значения $B_s=7$, $B_b=5$, количество множеств кеш-памяти $N=4$. Схема расположения данных будет выглядеть следующим образом (рис. 2).



Рис. 2 – Схема расположения данных при $B_s=7$, $B_b=5$, $N_s=4$.
 Fig. 2 – Data arrangement diagram for $B_s=7$, $B_b=5$, $N_s=4$.

Числами от 0 до 3 здесь обозначены номера множеств кеш-памяти, в которые будут отображаться данные строки основной памяти. В каждом шаблоне считываются пять строк (обведены) и две не считываются (не обведены). Видно, что множества заполняются неравномерно и промахи начнут генерироваться до полного заполнения кеш-памяти из-за попытки помещения данных в заполненные множества.

Сформулируем теорему о заполняемости множеств, следствия из которой станут основой для метода определения размера блока. Пусть L и M – положительные взаимно простые числа, есть последовательность чисел (список) A , формируемая как конкатенация последовательностей (списков) A' длины L со следующей структурой (1)

$$A' = [0, \dots, L - 1] \quad (1)$$

Пусть также есть список B' длины L , содержащий одну единицу в позиции k , остальные нули. Пусть есть упорядоченное множество B мощности M , первоначально содержащее нулевые значения. Пусть осуществляется обход списка A , для каждого элемента вычисляется функция $f(2)$, модифицирующая элементы B .

$$f: B(i \% M) = B(i \% M) + B'(i \% L) \quad (2)$$

где i – номер элемента A .

Тогда существует конечное число S пройденных элементов A , после которых все элементы B будут содержать единицы, причем $S = \text{НОК}(L, M)$, т.е. $S = L * M$ в данном случае. Проиллюстрируем теорему на примере. Пусть $L=7$, $M=3$. Тогда при длине списка A , равной $7*3=21$, $k=0$ получим следующие числовые ряды (рис.3).

A'	[	0	1	2	3	4	5	6	]														
i	[	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	]
A	[	0	<u>1</u>	2	3	<u>4</u>	5	6	<u>0</u>	<i>1</i>	<i>2</i>	<u>3</u>	<i>4</i>	5	<u>6</u>	<i>0</i>	1	<u>2</u>	<i>3</i>	4	<u>5</u>	<i>6</i>	]
B'	[	1	0	0	0	0	0	0	]														
B	[	1	1	1	]																		

Рис. 3 – Числовые ряды, иллюстрирующие теорему

Fig. 3 – Numerical series illustrating the theorem

В списке A элементы, используемые для модификации нулевого элемента B , выделены жирным на сером фоне, используемые для модификации первого элемента B выделены подчеркиванием, используемые для модификации второго элемента B , выделены курсивом. Можно сформулировать несколько следствий из данной теоремы.

Если в условии к теореме длина списка равна $S=L*M$, список B' содержит единицы в v позициях, в остальных содержит нули, $v \leq L$, тогда после прохода A все элементы B будут содержать значение v . Если L и M не являются взаимно простыми числами, тогда сформировать равномерно заполненное одинаковыми значениями множество B в соответствии с условием теоремы невозможно. Максимальная длина списка при этом также равна $S = \text{НОК}(L, M)$.

Интерпретация теоремы для подсистемы памяти BC:

L – длина шаблонов (шаг в памяти в элементах кеш-линий).;

M – число множеств в множественно-ассоциативном кеше;

B' – указывает на то, какие элементы в шаблонах кешируются;

B – множества кеша; значения элементов соответствуют количеству заполненных банков в конкретном множестве;

A – память.

Таким образом, для определения максимального размера блока, не вызывающего кеш-промахов, необходимо определить: характеристики анализируемого уровня кеш-памяти (в частности, определить количество множеств в каждом банке M); характеристики шаблона доступа к памяти (длину шаблона в кеш-линиях L , количество кеш-линий в шаблоне, к которым производится обращение – количество единиц в множестве B'); $S = \text{НОК}(L, M)$; с учетом степени ассоциативности определить максимальный размер блока.

Обсуждение результатов. Был проведен вычислительный эксперимент, который подтверждает сделанные ранее выводы. Эксперимент проводился на вычислительной системе, в состав которой входит МП 11th Gen Intel(R) Core(TM) i9-11900 @ 2.50GHz, который имеет следующие характеристики подсистемы памяти: - кеш $L1D$ имеет объем 48 кБ и степень ассоциативности 12; кеш $L2$ имеет объем 512 кБ и степень ассоциативности 8; длина кеш-линии составляет 64 байта. Для проведения вычислительного эксперимента использовался язык программирования C, тип данных double (размер переменной составляет 8 байт).

Выберем разные длины шаблона, проведем аналитический расчет максимальной длины блока, далее проведем вычислительный эксперимент для проверки результатов.

Количество множеств в банках кеш-памяти МП составляет 64 в L1D и 1024 в L2, будем менять значение длины блока L, в опыте используем одну кеш-строку из всего шаблона (рис. 4).



Рис. 4 - Структура блока данных
 Fig. 4 - Data block structure

Для этого при выделении памяти под массив учитываем выравнивание, также учитываем, что в одну строку кеша помещается 8 элементов double. В табл. 1 приведены характеристики двух шаблонов доступа в память, рассчитанные для кеша L2 в соответствии с предложенным методом.

Таблица 1 – Характеристики шаблонов доступа в память

Table 1 – Characteristics of memory access patterns

L, cl (d / b)	S=HOK(L,M)	c=S / L	N	S _B (d / b)	%
1024 (8192 / 64 кБ)	1024	1	8	65536 / 512Кб	0,098
512 (4096 / 32кБ)	1024	2	16	65536 / 512Кб	1,96

В первом столбце приведен размер шаблонов в кеш-линиях (cl), а также в элементах double (d) и байтах (b). Во втором столбце приводится значение наименьшего общего кратного для значений L и M (L2), которое в дальнейшем используется для расчета максимальной длины блоков. Длины шаблонов выбирались таким образом, чтобы заполнялось только одно множество в кеш-памяти каждого уровня. В третьем столбце приводится количество шаблонов, которые будут использоваться для размещения данных в одном банке L2. В четвертом столбце приводится количество шаблонов, непрерывно расположенных в памяти, которые помещаются в кеш-память L2, не вызывая промахов. В пятом столбце приводится общий размер блока в элементах double и байтах, В последнем столбце приводится процент заполнения кеш-памяти при использовании данного шаблона доступа до начала вытеснения строк. В результате были получены результаты, представленные на рис. 5 и 6. На рис. 5 представлен результат моделирования для L=8192d, на рис. 6 – L=4096d.

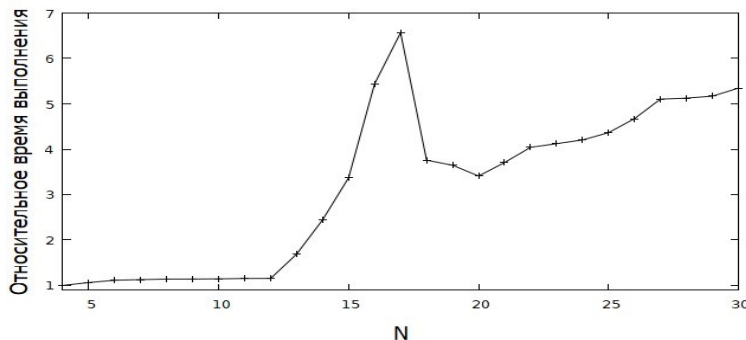


Рис. 5 – Результат моделирования для L=8192d

Fig. 5 – Simulation result for L=8192d

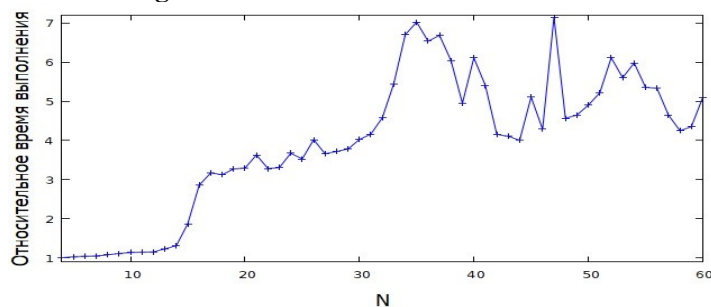


Рис. 6 - Результат моделирования для L=4096d

Fig. 6 - Simulation result for L=4096d

Измерения осуществлялись следующим образом. На первом этапе осуществлялся многократный доступ к элементам массива, размер которого совпадал с размером блока, состоящим из N шаблонов. Далее, для каждого измерения вычислялось среднее время обработки одного шаблона. На последнем этапе для каждого размера блока вычислялось относительное время выполнения, которое определялось как отношение среднего времени обработки шаблона к среднему времени обработки шаблона при $N=4$, с этого значения осуществлялось построение графика. При значении N , меньшем четырех, результаты оказываются зашумленными в связи со снижением вычислительной нагрузки и увеличением влияния длительности вспомогательных операций, например, операторов цикла.

Относительно полученных результатов можно сделать вывод, что они подтверждают сделанные аналитические оценки, при этом стоит отметить следующее. Промехи в L2 оказывают гораздо большее влияние на время выполнения программы, чем промехи в L1. Для кеша L2 промехи начинаются, начиная с N , приведенного в табл. 1, достигая максимума при размере блока, равным двойному размеру кеш-памяти ($N = 16$ на рис. 5 и $N = 32$ на рис. 6). Особенно хорошо данный эффект заметен на рис. 6. Т.к. используемые длины шаблонов подбирались таким образом, чтобы демонстрировать промехи в кешах обоих уровней, на этих рисунках можно наблюдать и промехи L1 при $N=12$ (степень ассоциативности кеша L1D). На рис. 5 эффект более заметен, т.к. на рис. 6 замедление при $N=12$ переходит в более значимое замедление при $N=16$, вызванное промехами в L2.

Третий эксперимент связан с анализом шаблонов, размер которых является взаимно простым числом с количеством множеств кеш-памяти (1024 в L2). Было выбрано значение 17 кеш-строк (136 в элементах double). Результат эксперимента приведен на рис. 7.

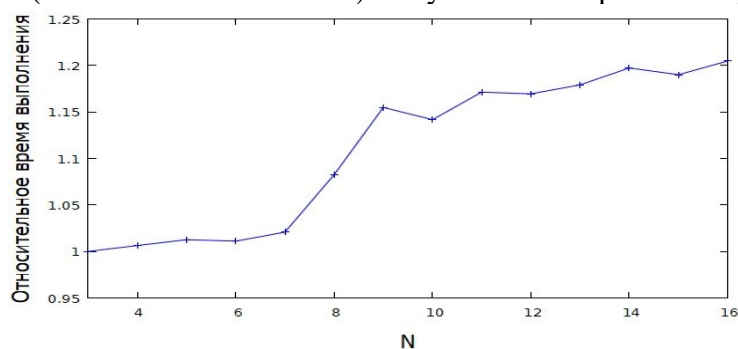


Рис. 7 - Результат эксперимента для размера шаблона, взаимно простого с размером множества L2

Fig. 7 - Experimental result for a pattern size that is relatively prime to the size of the L2 set

Эксперимент проводился следующим образом. Фиксировался размер шаблона (17 кеш-линий или 136 double). Далее варьировалось заполнение шаблона, параметр N на графике соответствует текущему заполнению (от 1 до 16 кеш-линий). Относительное время выполнения считалось аналогично графикам на рис. 5 и 6. В соответствии со следствиями из приведенной теоремы, при подобном размере шаблона кеш-промехи не будут генерироваться при заполнении, не превышающем степень ассоциативности кеш-памяти. На графике (рис. 7) видно, что рост времени выполнения наблюдается при $N=8$, что соответствует степени ассоциативности L2. Результат эксперимента также полностью подтверждает сделанные ранее выводы.

Вывод. Представлен метод определения максимального размера блока данных в блочных алгоритмах, при котором гарантируется эффективная работа подсистемы памяти ВС. Другими словами, предложен метод, позволяющий определять размеры блоков, при которых на определенном уровне кеш-памяти не будет генерироваться кеш-промахов или количество этих промахов будет оставаться на приемлемом уровне.

Данный подход удобен тем, что может использоваться на начальных этапах проектирования ПС, не прибегая к динамическому анализу приложения, включающему в себя этапы получения исполняемого кода приложения и анализ его с помощью специальных

приложений, в данном случае используется статический анализ исходного кода программы. В работе проанализирован доступ к одному массиву, однако, подобный подход может быть использован для оценки максимальных размеров нескольких массивов, одновременно используемых в приложении.

Зависимости, представленные на графиках, в большей степени отражают процессы, происходящие в кеш-памяти L2, чем в L1D. Это связано с большей разницей в скорости работы между L3 и L2, чем между L2 и L1D, таким образом, промахи в L2 приводят к большим временным задержкам, чем промахи в L1.

Кроме того, в процессе анализа использовался регулярный доступ к памяти: шаблоны обрабатывались последовательно друг за другом, внутри шаблона данные также обрабатывались последовательно. Это приводило к тому, что механизм предвыборки данных, существующий во всех современных МП, сглаживал проблемы, связанные с кеш-промахами (например, на рис. 5 и 6 не наблюдается резкое увеличение времени обработки при генерации кеш-промахов в L2 при N=8, хотя увеличение времени обработки имеет место). При другом порядке обращения к элементам блоков, например, при случайном порядке обработки, эффекты были бы более акцентированными. Однако, был выбран регулярный порядок обработки, т.к. в большинстве реальных задач используется именно он. Проведенные вычислительные эксперименты подтвердили выводы, полученные в соответствии с предложенным методом и доказали его эффективность.

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-21-20073 (<https://rscf.ru/project/25-21-20073/>) и гранта администрации Волгоградской области.

Acknowledgments. The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 25-21-20073 (<https://rscf.ru/project/25-21-20073/>) and a grant from the Volgograd Region Administration.

Библиографический список:

1. Lawson C.L., Hanson R.J., Kincaid D.R., Krogh F.T. Basic Linear Algebra Subprograms for Fortran Usage //ACM Transactions on Mathematical Software. 1979. Vol. 5, no. 3. P. 308-323. DOI: 10.1145/355841.355847.
2. Dongarra J.J., Du Croz J., Hammarling S., Hanson R.J. An Extended Set of FORTRAN Basic Linear Algebra Subprograms//ACM Transactions on Mathematical Software. 1988. Vol. 14, no. 1. P. 1-17. DOI: 10.1145/42288.42291.
3. Xianyi Z., Qian W., Yunquan Z. Model-driven level 3 BLAS performance optimization on Loongson 3A processor//2012 IEEE 18th International Conference on Parallel and Distributed Systems (Singapore, December 17—19, 2012). Boston, Massachusetts, USA, IEEE Xplore Digital Library, 2012. P. 684—691. DOI: 10.1109/ICPADS.2012.97
4. Intel Math Kernel Library Reference Manual. URL: <https://www.bu.edu/tech/files/2010/02/mklman61.pdf> (дата обращения: 06.02.2025).
5. Goto K., Van De Geijn R. High-Performance Implementation of the Level-3 BLAS // ACM Transactions on Mathematical Software. 2008. Vol. 35, no. 1. P. 4:1—4:14. DOI: 10.1145/1377603.1377607.
6. Goto K., Geijn R.A. Anatomy of High-Performance Matrix Multiplication // ACM Transactions on Mathematical Software. 2008. Vol. 34, 158 no. 3. P. 12:1—12:25. DOI: 10.1145/1356052.1356053.
7. K. Czarnecki, U.W. Eisenecker, R. Glück, D. Vandevoorde, and T.L. Veldhuizen. Generative programming and active libraries. In Selected Papers from the International Seminar on Generic Programming, pages 25—39, London, UK, 2000. Springer-Verlag.
8. Low T.M., Igual F.D., Smith T.M., Quintana-Orti E.S. Analytical Modeling Is Enough for High-Performance BLIS // ACM Transactions on Mathematical Software. 2016. Vol. 43, no. 2. P. 12:1-12:18. DOI: 10.1145/2925987.
9. Kravets A.G., Egunov V. The software cache optimization-based method for decreasing energy consumption of computational clusters //Energies. – 2022. – Т. 15. – №. 20. – С. 7509..
10. Егунов, В.А. Метод улучшения стратегии кеширования для вычислительных систем с общей памятью / В.А. Егунов, А.Г. Кравец // Программная инженерия. - 2023. - Т. 14, № 7. - С. 329-338.
11. Егунов, В.А. Новый метод повышения эффективности векторизации операций BLAS / В.А. Егунов, А.Г. Кравец // Информационные технологии. - 2024. - Т. 30, № 6. - С. 318-328.

References:

1. Lawson C.L., Hanson R.J., Kincaid D.R., Krogh F.T. Basic Linear Algebra Subprograms for Fortran Usage. *ACM Transactions on Mathematical Software*. 1979;5(3):308—323. DOI: 10.1145/355841.355847.
2. Dongarra J.J., Du Croz J., Hammarling S., Hanson R.J. An Extended Set of FORTRAN Basic Linear Algebra Subprograms. *ACM Transactions on Mathematical Software*. 1988;14(1):1-17. DOI: 10.1145/42288.42291.
3. Xianyi Z., Qian W., Yunquan Z. Model-driven level 3 BLAS performance optimization on Loongson 3A processor // 2012 IEEE 18th International Conference on Parallel and Distributed Systems (Singapore, December 17—19, 2012). Boston, Massachusetts, USA, IEEE Xplore Digital Library, 2012:684-691. DOI: 10.1109/ICPADS.2012.97
4. Intel Math Kernel Library Reference Manual. URL: <https://www.bu.edu/tech/files/2010/02/mklman61.pdf> (date of request: 06.02.2025).
5. Goto K., Van De Geijn R. High-Performance Implementation of the Level-3 BLAS. *ACM Transactions on Mathematical Software*. 2008;35(1):4:1-4:14. DOI: 10.1145/1377603.1377607.
6. Goto K., Geijn R.A. Anatomy of High-Performance Matrix Multiplication. *ACM Transactions on Mathematical Software*. 2008;34(158(3)):12:1—12:25. DOI: 10.1145/1356052.1356053.
7. K. Czarnecki, U. W. Eisenecker, R. Glück, D. Vandevoorde, and T. L. Veldhuizen. Generative programming and active libraries. In *Selected Papers from the International Seminar on Generic Programming*, pages 25–39, London, UK, 2000. Springer-Verlag.
8. Low T.M., Igual F.D., Smith T.M., Quintana-Orti E.S. Analytical Modeling Is Enough for High-Performance BLIS. *ACM Transactions on Mathematical Software*. 2016; 43(2):12:1—12:18. DOI: 10.1145/2925987.
9. Kravets A.G., Egunov V. The software cache optimization-based method for decreasing energy consumption of computational clusters. *Energies*. 2022;15(20):7509.
10. Egunov V.A. A method for improving caching strategies for shared memory computing systems / Egunov V.A., Kravets A.G.. *Software Engineering*. 2023;14(7): 329-338. (In Russ.)
11. Egunov V.A. A new method to increase the efficiency of vectorization of BLAS operations / Egunov V.A., Kravets A.G. *Information technology*. 2024;30(6): 318-328. (In Russ.)

Сведение об авторе:

Виталий Алексеевич Егунов, кандидат технических наук, доцент; доцент кафедры «Электронно-вычислительные машины и системы»; vegunov@mail.ru

Information about author:

Vitaly A. Egunov, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Assoc. Prof., Computers and Systems Department; vegunov@mail.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 06.02.2025.

Одобрена после/рецензирования Revised 30.03.2025.

Принята в печать/ Accepted for publication 17.05.2025.

**Причины возникновения, классификация и критичность уязвимостей
программного обеспечения информационных систем**

А.О. Ефимов

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

Резюме. Цель. Целью исследования является описание причин возникновения уязвимостей программного обеспечения, а также их классификация; устранение неопределённости понятия «критичность уязвимости программного обеспечения». **Метод.** Анализ существующих подходов к оценке, классификации, и определения уязвимостей программного обеспечения. Моделирование, построение UML модели, описание алгоритма. **Результат.** Дано определение критичности уязвимости программного обеспечения. Частично описаны причины возникновения уязвимостей программного обеспечения, расширена существующая классификация уязвимостей программного обеспечения. Приведен пример оценки критичности уязвимостей программного обеспечения на основе вычисляемых метрик. Приведен пример оценки и приоритизации метрик уязвимостей. Представлены UML модель и алгоритм оценки уязвимостей. **Вывод.** Результаты проведенного исследования расширяют перечень показателей и предметную область описания уязвимостей программного обеспечения.

Ключевые слова: уязвимость, критичность уязвимости, оценка уязвимостей, безопасность программного обеспечения, классификация уязвимостей.

Для цитирования: А.О. Ефимов. Причины возникновения, классификация и критичность уязвимостей программного обеспечения информационных систем. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025; 52(2):98-106. DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-2-98-106.

Causes, classification, and criticality of information system software vulnerabilities

A.O. Efimov

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

Abstract. Objective. The purpose of this paper is to describe the causes of software vulnerabilities, as well as their classification. Eliminating the ambiguity of the concept of software vulnerability criticality. **Method.** Analysis of existing approaches to the assessment, classification, and identification of software vulnerabilities. Modeling, building a UML model, and describing an algorithm. **Result.** A definition of the criticality of a software vulnerability is proposed. The causes of the software are partially described, and the existing classification of software vulnerabilities is expanded. An example of assessing the criticality of software vulnerabilities based on calculated metrics is given. An example of vulnerability metrics evaluation and prioritization is given. The UML model and vulnerability assessment algorithm are presented. **Conclusion.** The results of the conducted research expand the list of indicators and the subject area of the description of software vulnerabilities.

Keywords: vulnerability, criticality of vulnerability, vulnerability assessment, software security, vulnerability classification

For citation: A.O. Efimov. Causes, classification, and criticality of information system software vulnerabilities. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2025; 52(2):98-106. (In Russ) DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-2-98-106

Введение. Эксплуатация уязвимостей программного (программно-технического) обеспечения является одним из основных путей реализации угроз информационной безопасности. Рассмотрение одних лишь уязвимостей в отрыве от организационных и правовых мер защиты информации не даёт полноценной картины при рассмотрении защищенности информации в информационных (автоматизированных) системах (ИС), но является основным в случае полноценной реализации вышеуказанных мер, и причинения ущерба путем сетевых атак, преодоления разграничения доступа программных средств и подобных случаев.

В стандарте [1] определено, что уязвимость программного обеспечения – это недостаток (слабость) программного (программно-технического) средства или информационной системы в целом, который (ая) может быть использован (а) для реализации угроз безопасности информации.

Причины возникновения уязвимостей были рассмотрены в различных работах. Из их числа в работе [2] представлено моделирование атак и анализ защищенности компьютерных сетей на основе системы CVSS версии 3, что позволило устранить допущений при формировании графа действий злоумышленника, связанных с определением предусловий и постусловий атакующих действий. В [3] приведено обоснование показателей надёжности программной системы защиты информации от несанкционированного доступа, проведённое на основе анализа основных видов уязвимостей и взаимосвязи компонентов безопасности автоматизированной системы. В статье [4] разработаны модели безопасной системы, предложены критерии количественной оценки уровня безопасности. В [5] построена обобщенная модель комбинированного метода анализа параметрических данных на основе технологий интеллектуального анализа данных, позволяющая повысить эффективность работы специалиста по выявлению уязвимостей контролируемых информационных систем.

Постановка задачи. Целью исследования является описание причин возникновения уязвимостей программного обеспечения, а также их классификация; устранение неопределённости понятия «критичность уязвимости программного обеспечения».

В настоящее время существует несколько видов классификации уязвимостей программного обеспечения, в основном они основаны на понятии критичности (сравнения уязвимостей между собой по уровню опасности). Для унификации процесса оценки критичности уязвимостей применяются специализированные системы. Наиболее популярные из них:

1. Common Vulnerability Scoring System (CVSS). CVSS является международным стандартом для оценки тяжести уязвимостей. Он включает базовые, временные и контекстуальные метрики [6]. Ключевым преимуществом CVSS является его гибкость и возможность адаптации под различные сценарии. CVSS предоставляет числовую оценку (от 0 до 10), где более высокий балл указывает на более высокую критичность уязвимости [6].

2. OWASP Risk Rating Methodology. Методология OWASP ориентирована на анализ рисков, связанных с уязвимостями веб-приложений. Она предполагает использование факторов, таких как вероятность реализации угрозы и потенциальный ущерб. Данный подход позволяет адаптировать оценку под специфические бизнес-процессы [7].

3. Системы отраслевого применения. В определённых отраслях (например, промышленный IoT или системы SCADA) применяются специализированные методологии. Эти подходы акцентируют внимание на уникальных особенностях систем, таких как повышенная уязвимость к физическим атакам или строгие требования к отказоустойчивости. В работе [8] более подробно рассмотрены карты источников, содержащие сведения об уязвимостях программного обеспечения. В тоже время в [9] определено, что степень опасности уязвимости – это мера (сравнительная величина), характеризующая подверженность информационной системы уязвимости и ее влияние на нарушение свойств безопасности информации (конфиденциальность, целостность, доступность). Исходя из вышесказанного можно дать следующее определение:

Критичность уязвимости программного обеспечения – это показатель, указывающий на относительную величину (по сравнению с другими уязвимостями) возможного воздействия на защищаемую информацию (её конфиденциальность, целостность и доступность), а также на вероятность нарушения безопасного функционирования информационной (автоматизированной) системы в случае эксплуатации злоумышленником (или конфликта программных средств и иных способов непреднамеренной эксплуатации) рассматриваемой уязвимости программного обеспечения.

В целом можно сделать вывод что решение проблемы выявления, описания и классификации уязвимостей непосредственно влияет на возможность исключения несанкционированного доступа к ИС.

Методы исследования. Основываясь на существующих работах и исследованиях, в общем виде можно представить два основных множества уязвимостей:

1. Непреднамеренные уязвимости – возникают по причине ошибок при разработке программного кода, конфликта программ, существующих недостатков аппаратного обеспечения, недостатков интерфейсов и стандартов обработки информации. Возникновение непреднамеренных уязвимостей, как правило связано с неконтролируемыми факторами (с человеческим фактором, недостатками при проектировании, ошибками в процессе тестирования, недостаточным документированием, ошибками в зависимых программах и аппаратными сбоями).

2. Преднамеренные уязвимости – заведомо установленные разработчиком недостатки программного обеспечения в целях осуществления несанкционированного доступа к информации и выполнения недеklarированных возможностей. Также преднамеренные уязвимости могут возникать по причине использования скомпрометированной среды разработки (в том числе компиляторов и интерпретаторов). Возникновение преднамеренных уязвимостей связаны с намеренными действиями людей или организаций, направленными на внедрение слабых мест в автоматизированные системы. Основные из них: добавление недеklarированных возможностей, намеренное добавление скрытых интерфейсов доступа (бэкдоров), интеграция программных закладок в программное или аппаратное обеспечение, создание недеklarированных функций для обхода механизмов и средств защиты.

Помимо названных выше причин (которые по большей части относятся к производителю и пользователю программного продукта), также имеют место действия злоумышленников, которые могут быть произведены в процессе дистрибуции посредниками, участвующими в распространении программного обеспечения.

Среди них можно выделить следующие: внедрение вредоносного кода в процессе поставки ПО/оборудования, изменение базового программного обеспечения устройств с целью создания уязвимостей, подмена или модификация компонентов программы на этапе поставки, намеренное внедрение уязвимостей в целях тестирования безопасности продукта, без последующего удаления. В целях расширения предметной области и развития существующих классификаций, предложена следующая классификация уязвимостей:

- по природе происхождения: «преднамеренные», «непреднамеренные»;
- по типу эксплуатации: «обладает возможностью последовательной эксплуатации» (имеется в виду возможность формирования многофакторной уязвимости – уязвимость, появившаяся в результате наличия нескольких недостатков различных типов [9]), «обособленная»;
- по направленности возможного ущерба: «сопряжена с рисками для целостности/конфиденциальности/доступности данных», «сопряжена с рисками работоспособности ИС» (в соответствии с [10] – безопасность информационной технологии: состояние защищенности информационной технологии, при котором обеспечивается выполнение изделием, реализующим информационную технологию, предписанных функций без нарушений безопасности обрабатываемой информации);

– по потенциалу эксплуатации: «эксплуатация не оказывает существенного влияния на информацию», «позволяет причинить ущерб, который возможно отследить и устранить», «позволяет причинить неисправимый ущерб».

Также можно произвести классификацию по привычной шкале «критичности», но подразумевается необходимость отхода от величин экспертных оценок, к вычисляемым и реальным параметрам. По величине критичности: «некритическая», «низкой критичности», «средней критичности», «высокой критичности», «критическая».

Данные величины могут быть соотнесены на основе следующих метрик: «число неиспользуемых, но объявленных переменных», «неограниченные динамические переменные» (например, массивы, не обладающие ограничением к максимальным размерам), «наличие интерфейсов с возможностью запуска скриптов в явном виде», «процент числа проприетарных библиотек», «ограничение числа возникающих процессов обработки ошибок», «процент объема данных, хранящихся в незащищенном пространстве».

Данные показатели могут быть соотнесены для качественной оценки по процентным соотношениям, или абсолютным величинам. Возникает проблема постановки требований к ИС, так как по большей части, требования индивидуальны в зависимости от используемой архитектуры и специфики использования, в связи с чем, в данный момент требования по своей сути все равно будут являться одним из подвидов экспертной оценки. В целях ухода от экспертных оценок необходимо проведение исследований соотношения возникновения уязвимостей программного обеспечения относительно вышеуказанных метрик на основе статистических данных, которые позволят построить более наглядную картину о данном явлении.

Стоит заметить, что полноценной модели, описывающей соотношение данных величин и критичность уязвимостей в настоящее время не существует, и данная проблема является целью будущих исследований.

Так как необходимые статистические данные в настоящее время отсутствуют в свободном доступе, далее будет рассмотрен гипотетический пример применения рассмотренной классификации и метрик.

Описание: «VulTracker» – пример приложения для учёта рабочих задач. Рассмотрим определенные метрики (показатели) уязвимостей.

1. Неиспользуемые, но объявленные переменные. 18% переменных в коде не используются (540 из 3000 объявленных переменных). Наличие неиспользуемых переменных усложняет код, затрудняет его понимание и увеличивает вероятность ошибок при рефакторинге. Помимо этого, открывает дополнительные возможности для использования атак, направленных на переполнение памяти, и внедрения вредоносного кода. Согласно классификации, возможные уязвимости: «преднамеренные», «обособленные», «сопряжены с рисками для целостности/конфиденциальности/доступности данных», «позволяют причинить ущерб, который возможно отследить и устранить».

2. Неограниченные динамические переменные (например, массивы без ограничения максимального размера). 12% используемых массивов (около 24 из 200) не имеют ограничения по размеру. Позволяют привести к инцидентам с переполнением памяти, и отказом в обслуживании. Согласно классификации, возможные уязвимости: «преднамеренные» и «непреднамеренные», «обладают возможностью последовательной эксплуатации», «сопряжены с рисками работоспособности ИС», «позволяют причинить ущерб, который возможно отследить и устранить».

3. Наличие интерфейсов с возможностью запуска скриптов в явном виде. 2 из 7 интерфейсов (14%) позволяют пользователям загружать и запускать собственные скрипты. Интерфейсы могут быть использованы для выполнения несанкционированных действий с базой данных, и выгрузки конфиденциальных данных на внешний сервер. Согласно классификации, возможные уязвимости: «преднамеренные» и «непреднамеренные», «обладают возможностью последовательной эксплуатации», «сопряжены с рисками

для целостности/конфиденциальности/доступности данных» и «сопряжены с рисками работоспособности ИС», «позволяют причинить неисправимый ущерб».

4. Процент проприетарных библиотек. 65% библиотек (13 из 20) являются проприетарными и недоступными для проверки. Компоненты, отвечающие за обработку JSON, содержали устаревшую версию с известной уязвимостью CVE-2023-XXXX, что может позволить злоумышленникам обойти авторизацию и верификацию.

Согласно классификации, возможные уязвимости: «преднамеренные», «обладают возможностью последовательной эксплуатации», «сопряжены с рисками для целостности/конфиденциальности/доступности данных» и «сопряжены с рисками работоспособности ИС», «позволяют причинить неисправимый ущерб».

5. Ограничение числа возникающих процессов обработки ошибок. 22% (11 из 50) потенциальных исключений в коде остаются необработанными. Это может привести к сбоям в работе приложения при некорректных входных данных и оставить пользователю видимыми сообщения отладчика с конфиденциальной информацией.

Согласно классификации, возможные уязвимости: «преднамеренные» и «непреднамеренные», «обладают возможностью последовательной эксплуатации», «сопряжены с рисками для целостности/конфиденциальности/доступности данных» и «сопряжены с рисками работоспособности ИС», «позволяют причинить неисправимый ущерб».

6. Процент объёма данных, хранящихся в незащищённом пространстве.

37% (около 2,8 ГБ из 7,5 ГБ) данных хранятся в текстовом виде без шифрования. Данные могут быть легко скомпрометированы при получении доступа к ИС. Согласно классификации, возможные уязвимости: «преднамеренные», «обособленные», «сопряжены с рисками для целостности/конфиденциальности/доступности данных», «позволяют причинить неисправимый ущерб».

Помимо вышесказанного необходимо отметить, что достижимость уязвимости безусловно влияет на критичность, чем она выше, тем уязвимость критичнее. (Например, величина вероятности достижения уязвимости достаточно квалифицированным злоумышленником от 0% до 100%).

Обсуждение результатов. На основе полученных процентных соотношений возможно произвести градацию критичности возможных уязвимостей. Вопрос достижимости не рассматривается в связи со спецификой внешних и внутренних нарушителей для каждой конкретной ИС.

Критичность уязвимостей программного обеспечения. Рассмотрим простое процентное соотношение приведенного примера, график представлен на рис. 1.

При рассмотрении простого соотношения критичности с шагом в 25% ([0%] – не критическая, [0-25%] – низкий уровень критичности, [25-50%] – средний уровень критичности, [50-75%] – высокий уровень критичности, [75- 100%] – критичный уровень) получаем, что первые три показателя обладают низкой критичностью, показатель процента проприетарных библиотек обладает высокой критичностью, показатель обработки ошибок низкой критичностью, показатель незащищенных данных средней критичностью.

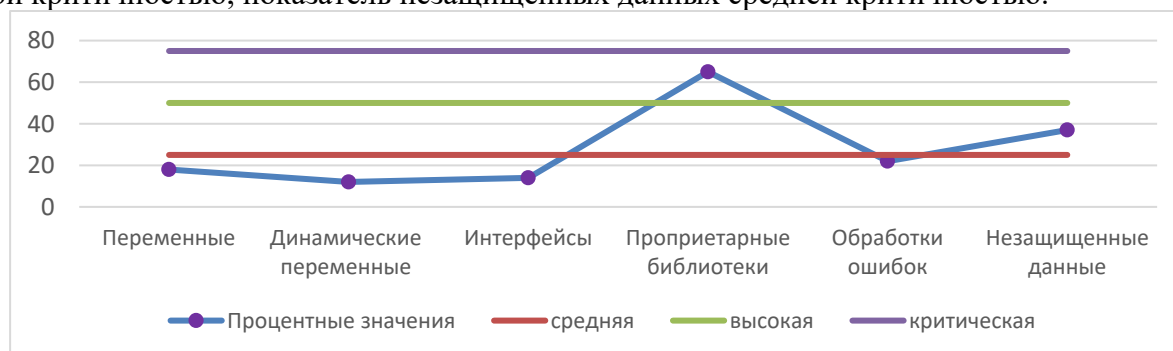


Рис. 1- Процентное соотношение уязвимостей
Fig. 1 - Percentage of vulnerabilities

Определим, что для нашей ИС куда большим потенциалом обладают уязвимости, которые могут быть достижимы посредством сетевой атаки (интерфейсы, незащищенные данные, проприетарные библиотеки). В таком случае имеющиеся процентные значения уровня критичности снизим в целях повышения их приоритезации (например, на 15%). Получим (рис. 2).

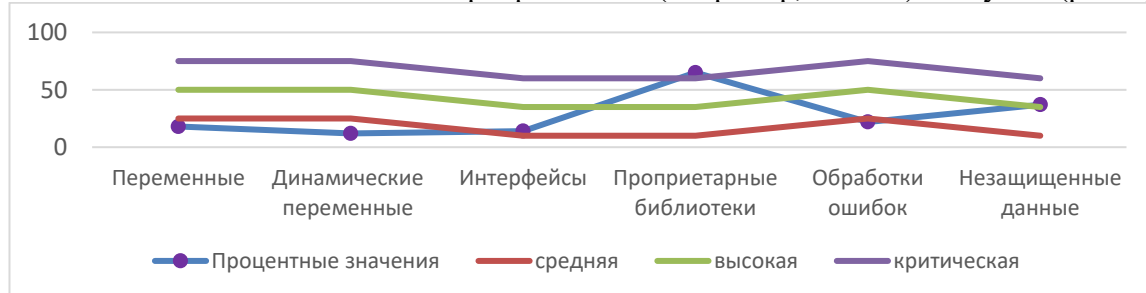


Рис. 2 - Процентное соотношение уязвимостей (приоритезация)

Fig. 2 - Percentage of vulnerabilities (prioritization)

При наличии достаточных статистических данных могут применяться более аккуратные значения приоритезации, либо иного ранжирования уровней критичности (с другим шагом) для уязвимостей различных типов.

Показатель уровня критичности должен быть согласован с действительной возможностью достижения уязвимостей того, либо иного типа, в зависимости от этого, для уязвимости должно быть присвоено значение критичности для каждой конкретной конфигурации. Также для оценки критичности уязвимостей всего продукта, согласно [11] сведем процентные показатели в одномерный массив:

$$V_{\Pi} = [V_1 \quad V_2 \quad \dots \quad V_m], \quad (1)$$

где V_m – показатель критичности метрики уязвимости программы.

Наибольшее значение критичности будет отражать критичность возможных уязвимостей всего продукта.

$$V_{\Pi_{\text{крит.}}} = \max [V_m]. \quad (2)$$

При этом качественная оценка дается в зависимости от приоритезации показателей.

Рассмотрим на нашем примере: $V_{\Pi} = [18 \quad 12 \quad 14 \quad 65 \quad 25 \quad 35]$,

$$V_{\Pi_{\text{крит.}}} = 65.$$

При рассмотрении с равным распределением критичностей, то получаем высокий уровень критичности. При приоритезации – критический. Также данный процесс возможно представить в виде UML-диаграммы, и алгоритма (рис. 3).

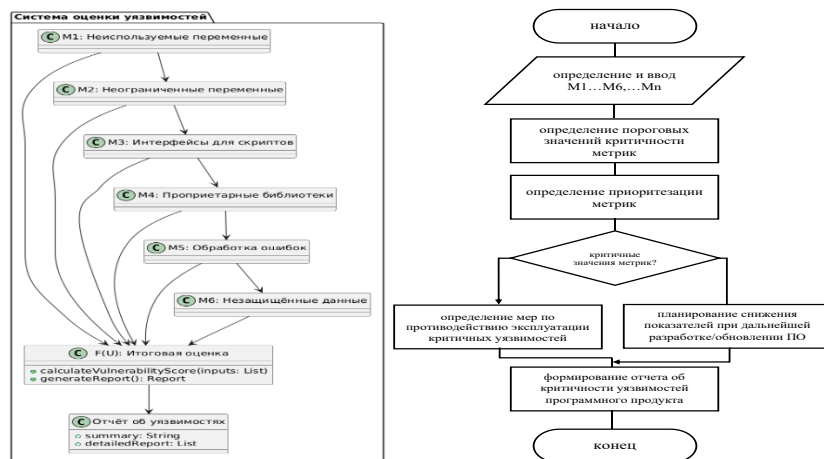


Рис. 3 - UML-диаграмма и алгоритм оценки уязвимостей

Fig. 3 - UML-diagram and vulnerability assessment algorithm

Вывод. В работе предложен подход к оценке уязвимостей автоматизированных систем, основанный на анализе ключевых метрик, влияющих на уровень защищённости программного обеспечения. В рамках исследования были определены и классифицированы метрики, отражающие наиболее значимые аспекты уязвимостей: наличие неиспользуемых переменных, динамических структур данных без ограничений, интерфейсов с возможностью выполнения скриптов, использование проприетарных библиотек, ограничение обработки ошибок и объём незащищённых данных. Дополнительная информация по предметной области представлена в [12-20].

Предложена модель, позволяющая установить взаимосвязь между перечисленными метриками и итоговым уровнем уязвимости, что способствует более точной количественной оценке защищённости информации и ИС. Интеграция результатов исследования позволит повысить точность оценки уровня защищённости автоматизированных систем, автоматизировать процесс выявления наиболее уязвимых компонентов программных продуктов в целях доработки; ускорить и повысить качество принятия решений по устранению выявляемых уязвимостей.

Библиографический список:

1. ГОСТ Р 58142-2018. Информационная безопасность. Методы и средства защиты информации. Общие положения. – Введ. 2018-12-01. – М.: Стандартинформ, 2018. – 24 с.
2. Дойникова, Е. В. Оценка защищённости компьютерных сетей на основе метрик CVSS / Е. В. Дойникова, А.А. Чечулин, И.В. Котенко // Информационно-управляющие системы. – 2017. – № 6(91). – С. 76–87. – DOI 10.15217/issn1684-8853.2017.6.76. – EDN ZXWUWH.
3. Дровникова, И.Г. Основные виды уязвимостей и взаимосвязь компонентов безопасности при обосновании показателей надёжности системы защиты информации от несанкционированного доступа в автоматизированных системах / И.Г. Дровникова, А.С. Етепнев, Е.А. Rogozin // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2019. – № 3. – С. 59–64. – EDN VWGONH.
4. Щеглов, К.А. Защита от атак на уязвимости приложений. Модели контроля доступа / К.А. Щеглов, А.Ю. Щеглов // Вопросы защиты информации. – 2013. – № 2(101). – С. 36–43. – EDN QAVHRX.
5. Коноваленко, С.А. Выявление уязвимостей информационных систем посредством комбинированного метода анализа параметрических данных, определяемых системами мониторинга вычислительных сетей / С.А. Коноваленко, И.Д. Королев // Альманах современной науки и образования. – 2016. – № 11(113). – С. 60–66. – EDN XEEDXH.
6. Forum of Incident Response and Security Teams. Common Vulnerability Scoring System version 4.0: Specification Document [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.first.org/cvss/specification-document> (дата обращения: 16.01.2025).
7. OWASP Foundation. OWASP Risk Rating Methodology [Электронный ресурс]. – URL: https://owasp.org/www-community/OWASP_Risk_Rating_Methodology (дата обращения: 16.01.2025).
8. Карты источников, содержащих сведения об уязвимостях программного обеспечения / А.Л. Сердечный, М.А. Тарелкин, А.А. Ломов, К.В. Симонов // Информация и безопасность. – 2019. – Т. 22, № 3. – С. 411–422. – EDN ZOUMGN.
9. ГОСТ Р 56546-2015. Информационная безопасность. Защита информации. Показатели защищённости информационных систем. – Введ. 2016-01-01. – М.: Стандартинформ, 2016. – 12 с.
10. ГОСТ Р 53114-2008. Информационная технология. Защита информации. Основные термины и определения. – Введ. 2009-01-01. – М.: Стандартинформ, 2009. – 14 с.
11. Концептуальные основы оценки уровня защищённости автоматизированных систем на основе их уязвимости / А.О. Ефимов, И.И. Лившиц, Т.В. Мещерякова, Е.А. Rogozin // Безопасность информационных технологий. – 2023. – Т. 30, № 2. – С. 63–79. – DOI 10.26583/bit.2023.2.04. – EDN LGPQZP.
12. Аветисян А.И., Белеванцев А.А., Чукаев И.И. Технологии статического и динамического анализа уязвимостей программного обеспечения. Вопросы кибербезопасности. 2014, № 3(4), с. 20–28. – EDN SSYPXV.
13. Russell R. et al. Automated Vulnerability Detection in Source Code Using Deep Representation Learning. 17th IEEE International Conference on Machine Learning and Applications (ICMLA), Orlando, FL, USA. 2018, p. 757–762. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ICMLA.2018.00120>.
14. Wang T., Wei T., Gu G. and Zou W. TaintScope: A Checksum-Aware Directed Fuzzing Tool for Automatic Software Vulnerability Detection. IEEE Symposium on Security and Privacy, Oakland, CA, USA. 2010, p. 497–512. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/SP.2010.37>.
15. Lin G., Wen S., Han Q. -L., Zhang J. and Xiang Y. Software Vulnerability Detection Using Deep Neural Networks: A Survey in Proceedings of the IEEE. Oct. 2020, vol. 108, no. 10, p. 1825–1848. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/JPROC.2020.2993293>.

16. Кубарев, А.В. Подход к формализации уязвимостей информационных систем на основе их классификационных признаков / А.В. Кубарев // Вопросы кибербезопасности. – 2013. – № 2(2). – С. 29–33. – EDN SZEDHH.
17. Ланкин, О.В. Системно-комплексный кибернетический подход к формированию методологических основ интеллектуальной защиты информации от несанкционированного доступа / О.В. Ланкин, В.И. Сумин, Е.В. Воронова // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2011. – Т. 7, № 8. – С. 174–176. – EDN NYIJQT.
18. Лившиц И.И. Метод оценивания безопасности облачных ИТ-компонент по критериям существующих стандартов / И. И. Лившиц // Труды СПИИРАН. – 2020. – Т. 19, № 2. – С. 383–411. – DOI 10.15622/sp.2020.19.2.6. – EDN DPCIDQ.
19. Методика оценки уровня критичности уязвимостей программных, программно-аппаратных средств : утв. ФСТЭК России 28 октября 2022 г. : методический документ ФСТЭК России от 28.02.2022 г. URL: <https://fstec.ru/dokumenty/vse-dokumenty/spetsialnye-normativnye-dokumenty/metodicheskij-dokument-ot-28-oktyabrya-2022-g-2> (дата обращения: 04.10.2024).
20. Методики оценивания надежности систем защиты информации от несанкционированного доступа в автоматизированных системах/О.И. Бокова, И.Г. Дровникова, А.С. Етепнев [и др.]/Труды СПИИРАН. – 2019. – Т. 18, № 6. – С. 1301–1332. – DOI 10.15622/sp.2019.18.6.1301-1332. – EDN YBHXOB.

References:

1. GOST R 58142-2018. Information Security. Methods and Tools for Information Protection. General Provisions. – Enacted on 2018-12-01. Moscow: Standartinform, 2018;24 p.(In Russ)
2. Doinikova, E.V. Evaluation of Computer Network Security Based on CVSS Metrics / E.V. Doinikova, A.A. Chechulin, I.V. Kotenko. *Information and Control Systems*. 2017;6(91):76–87. DOI: 10.15217/issn1684-8853.2017.6.76. – EDN ZXWUWH. (In Russ)
3. Drovnikova, I.G. Main Types of Vulnerabilities and the Relationship of Security Components in Justifying Indicators of Information Protection System Reliability Against Unauthorized Access in Automated Systems / I.G. Drovnikova, A.S. Etepnev, E.A. Rogozin. *Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics*. 2019; 3: 59–64. – EDN VWGOHY. (In Russ)
4. Shcheglov, K.A. Protection Against Application Vulnerability Attacks. Access Control Models/ K.A. Shcheglov, A.Yu. Shcheglov. *Information Security Issues*. 2013; 2(101):36–43. EDN QAVHRX. (In Russ)
5. Konovalenko, S.A. Detection of Information System Vulnerabilities Using a Combined Method for Analyzing Parametric Data Determined by Network Monitoring Systems / S.A. Konovalenko, I.D. Korolev. *Almanac of Modern Science and Education*. 2016;11(113): 60–66. – EDN XEEDXH. (In Russ)
6. Forum of Incident Response and Security Teams. Common Vulnerability Scoring System version 4.0: Specification Document [Electronic resource]. – URL: <https://www.first.org/cvss/specification-document> (accessed on 16.01.2025).
7. OWASP Foundation. OWASP Risk Rating Methodology [Electronic resource]. – URL: https://owasp.org/www-community/OWASP_Risk_Rating_Methodology (accessed on 16.01.2025).
8. Sources Containing Information on Software Vulnerabilities / A.L. Serdechny, M. A. Tarelkin, A.A. Lomov, K.V. Simonov. *Information and Security*. 2019; 22(3): 411–422. – EDN ZOUMGN. (In Russ)
9. GOST R 56546-2015. Information Security. Information Protection. Security Indicators of Information Systems. – Enacted on 2016-01-01. – Moscow: Standartinform, 2016;12 p. (In Russ)
10. GOST R 53114-2008. Information Technology. Information Protection. Basic Terms and Definitions. – Enacted on 2009-01-01. – Moscow: Standartinform, 2009; 14 p. (In Russ)
11. Conceptual Foundations for Assessing the Security Level of Automated Systems Based on Their Vulnerabilities / A.O. Efimov, I.I. Livshits, T.V. Meshcheryakova, E.A. Rogozin. *Information Technology Security*. 2023;30(2):63–79. – DOI: 10.26583/bit.2023.2.04. – EDN LGPQZP. (In Russ)
12. Avetisyan, A.I., Belevantsev, A.A., Chuklyaev, I.I. Technologies for Static and Dynamic Analysis of Software Vulnerabilities. *Cybersecurity Issues*. 2014;3(4): 20–28. – EDN SSYPXV. (In Russ)
13. Russell, R. et al. Automated Vulnerability Detection in Source Code Using Deep Representation Learning. 17th IEEE International Conference on Machine Learning and Applications (ICMLA), Orlando, FL, USA. 2018; p. 757–762. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ICMLA.2018.00120>.
14. Wang, T., Wei, T., Gu, G., and Zou, W. TaintScope: A Checksum-Aware Directed Fuzzing Tool for Automatic Software Vulnerability Detection. IEEE Symposium on Security and Privacy, Oakland, CA, USA. 2010; p. 497–512. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/SP.2010.37>.
15. Lin, G., Wen, S., Han, Q. -L., Zhang, J., and Xiang, Y. Software Vulnerability Detection Using Deep Neural Networks: A Survey in *Proceedings of the IEEE*. Oct. 2020;108(10):1825–1848. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/JPROC.2020.2993293>.
16. Kubarev, A.V. Approach to Formalizing Information System Vulnerabilities Based on Their Classification Features / A.V. Kubarev. *Cybersecurity Issues*. 2013; 2(2): 29–33. – EDN SZEDHH. (In Russ)

17. Lankin, O.V. Systemic-Cybernetic Approach to Forming Methodological Foundations for Intelligent Protection of Information from Unauthorized Access / O.V. Lankin, V.I. Sumin, E.V. Voronova. *Bulletin of Voronezh State Technical University*. 2011; 7(8):174–176. – EDN NYIJQT. (In Russ)
18. Livshits, I.I. A Method for Evaluating the Security of Cloud IT Components Based on Existing Standards / I.I. Livshits. *SPIIRAS Proceedings*. 2020;19(2):383–411. DOI: 10.15622/sp.2020.19.2.6. – EDN DPCIDQ. (In Russ)
19. Methodology for Assessing the Criticality Level of Vulnerabilities in Software and Hardware-Software Tools: Approved by FSTEC of Russia on October 28, 2022: Methodological Document of FSTEC of Russia from October 28, 2022. URL: <https://fstec.ru/dokumenty/vse-dokumenty/spetsialnye-normativnye-dokumenty/metodicheskij-dokument-ot-28-oktyabrya-2022-g-2> (accessed on 04.10.2024). (In Russ)
20. Methodologies for Assessing the Reliability of Information Protection Systems Against Unauthorized Access in Automated Systems / O.I. Bokova, I.G. Drovnikova, A.S. Etepnev [et al.]. *SPIIRAS Proceedings*. 2019;18(6):1301–1332. – DOI: 10.15622/sp.2019.18.6.1301-1332. – EDN YBHXOB. (In Russ)

Сведения об авторе:

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

Information about author:

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

Конфликт интересов / Conflict of interest

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

Поступила в редакцию/Received 17.01.2025.

Одобрена после/рецензирования Revised 01.03.2025.

Принята в печать/ Accepted for publication 29.05.2025.

Стратегии защиты от угроз безопасности: развитие системы обеспечения кибербезопасности

Г.И. Качаева¹, Н.Г. Султанов²

¹Дагестанский государственный технический университет,
367015, г. Махачкала, проспект Имама Шамиля 70, Россия,

²Дагестанский государственный университет,
367000, г. Махачкала, ул. М. Гаджиева, 43-а, Россия

Резюме. Цель. Актуальность исследования обусловлена стремительным развитием цифровой экономики и ростом киберугроз, угрожающих безопасности персональных данных и финансовых операций. Целью научного исследования является анализ современных стратегий защиты от киберугроз и развитие системы кибербезопасности в условиях цифровой трансформации. **Метод.** Методы исследования включают анализ литературы, статистических данных и практических кейсов. **Результат.** Рассмотрены основные типы кибератак (фишинг, DDoS, вредоносные программы, кибершпионаж) и ключевые технологии защиты, включая шифрование AES-256, многофакторную аутентификацию (MFA) и системы обнаружения вторжений (IDS). Особое внимание уделено стратегиям: проактивной защите, адаптивной безопасности и архитектуре «нулевого доверия», с примерами их применения в России (Сбербанк, Ростелеком, медучреждения). Изучены механизмы предотвращения атак и повышения киберустойчивости, включая роль ГосСОПКА, обработавшей в 2023 году свыше 500 тысяч инцидентов. Выявлены уязвимости систем и предложены способы их минимизации, такие как модернизация технических средств, развитие кадрового потенциала и совершенствование нормативной базы. **Вывод.** Практическая значимость заключается в разработке рекомендаций по внедрению стратегий, позволивших сократить ущерб от атак на 18% в 2023 году, и повышению эффективности защиты данных. Необходим системный подход к интеграции инноваций и координации усилий для обеспечения устойчивого развития кибербезопасности в России.

Ключевые слова: кибербезопасность, цифровая экономика, киберугрозы, проактивная защита, адаптивная безопасность, нулевое доверие, защита данных, ГосСОПКА.

Для цитирования: Г.И. Качаева, Н.Г. Султанов. Стратегии защиты от угроз безопасности: развитие системы обеспечения кибербезопасности. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025; 52(2):107-115. DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-2-107-115

Security threat protection strategies: development of a cybersecurity system

G.I. Kachaeva¹, N.G. Sultanov²

¹Daghestan State Technical University,

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

²Daghestan State University,

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

Abstract. Objective. The relevance of this study stems from the rapid advancement of the digital economy and the escalating cyber threats that jeopardize the security of personal data and financial transactions. The aim of the scientific research is to analyze modern strategies for protecting against cyber threats and to advance the development of a cybersecurity system in the context of digital transformation. **Method.** Research methods encompass literature review, statistical

analysis, and case studies. **Result.** The paper considers the types of cyberattacks (phishing, DDoS, malware, cyber espionage) and key security technologies, including AES-256 encryption, multi-factor authentication (MFA), and intrusion detection systems (IDS). Attention is paid to the following strategies: proactive defense, adaptive security, and zero trust architecture, with examples of their application in Russia (Sberbank, Rostelecom, medical institutions). The paper studies the mechanisms for preventing attacks and increasing cyber resilience, including the role of GosSOPKA, which processed over 500 thousand incidents in 2023. The paper identifies system vulnerabilities and proposes ways to minimize them: upgrading technical equipment, developing human resources, and improving the regulatory framework. **Conclusion.** The practical significance lies in the development of recommendations for the implementation of strategies that reduced damage from attacks by 18% in 2023. A systematic approach is needed to integrate innovations and coordinate efforts to ensure sustainable development of cybersecurity in Russia.

Keywords: cybersecurity, digital economy, cyber threats, proactive defense, adaptive security, zero trust, data protection, GosSOPKA

For citation: G.I. Kachaeva, N.G. Sultanov. Security threat protection strategies: development of a cybersecurity system. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2025;52(2):107-115. (In Russ) DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-2-107-115

Введение. В условиях стремительной цифровизации экономики информационные технологии становятся ключевым элементом практически всех сфер деятельности. С каждым годом увеличивается количество цифровых сервисов, используемых как в повседневной жизни граждан, так и в бизнесе, и государственном управлении. Однако вместе с ростом технологических возможностей увеличиваются и риски, связанные с киберугрозами. Мошенники и злоумышленники активно применяют новые технологии для доступа к конфиденциальной информации и финансовым ресурсам. Это делает кибербезопасность одной из важнейших задач современного общества и бизнеса.

Постановка задачи. Защита данных и обеспечение безопасности информационных систем становятся приоритетными направлениями в цифровой трансформации [1-3]. В связи с этим необходимо разрабатывать комплексные стратегии и методы защиты от кибератак, чтобы минимизировать риски и повысить устойчивость к угрозам.

Степень изученности проблемы кибербезопасности в России на современном этапе высока и охватывает множество аспектов, связанных с цифровизацией и защитой информационных систем. Сегодня активно исследуются как теоретические, так и практические вопросы обеспечения кибербезопасности, особенно в контексте банковского сектора и промышленных предприятий. Исследования, проводимые такими авторами, как Вахрушев и Липовская (2019), Кобец (2024), и Ронжина с Глазатовым (2023), выделяют особенности формирования рынка услуг кибербезопасности, а также основные угрозы, с которыми сталкиваются различные организации. Наиболее актуальными становятся вопросы интеграции новых технологий и методов защиты в условиях растущих киберугроз и финансовых рисков, что освещают работы Поляковой (2019) и Шкодинского с соавторами (2021). Научные исследования, проведенные Ноговицыным (2023) и Обуховой с Пиялыцевым (2020), акцентируют внимание на необходимости комплексного подхода к защите информационных данных и систем в условиях цифровой трансформации.

Эти исследования подчеркивают важность создания стратегий для повышения уровня кибербезопасности на уровне отдельных компаний и в масштабах национальной экономики. Накопленный опыт и результаты научных изысканий позволяют утверждать, что проблемы кибербезопасности не только активно изучаются, но и требуют дальнейшего внимания с учетом быстро меняющегося цифрового ландшафта и новых вызовов, связанных с киберугрозами.

Методы исследования. В условиях стремительного роста киберугроз разработка и внедрение современных стратегий защиты становятся ключевым фактором обеспечения кибербезопасности. Среди наиболее эффективных подходов выделяются следующие:

1. Проактивная защита – стратегия, направленная на активный поиск угроз до того, как они проявят себя. Это включает мониторинг аномалий в сетевом трафике и поведении пользователей с использованием систем на основе искусственного интеллекта (ИИ). Например, в 2023 году крупные российские банки, такие как Сбербанк, внедрили системы Threat Hunting, что позволило снизить количество успешных фишинговых атак на 15% (по данным Центрального банка РФ).
2. Адаптивная безопасность – подход, предполагающий гибкость защитных систем и их способность адаптироваться к новым угрозам в реальном времени. Он включает использование многоуровневых систем защиты, таких как межсетевые экраны нового поколения (NGFW) и системы предотвращения вторжений (IPS). В России такие решения активно применяются в телекоммуникационном секторе: операторы связи, например «Ростелеком», используют адаптивные системы для защиты от DDoS-атак, что сократило время простоя сервисов на 30% в 2023 году.
3. Архитектура «нулевого доверия» – стратегия, основанная на принципе «никому не доверяй, всегда проверяй». Она требует обязательной аутентификации и проверки каждого пользователя и устройства, даже внутри корпоративной сети. Этот подход набирает популярность в медицинских учреждениях России: после серии атак на базы данных в 2022–2023 годах ряд клиник внедрил Zero Trust, что снизило утечки данных на 25% (по данным Росздравнадзора).

Эти стратегии требуют интеграции современных технологий, таких как шифрование AES-256, многофакторная аутентификация (MFA) и системы обнаружения вторжений (IDS). По данным компании «Лаборатория Касперского», в 2023 году использование MFA в российских организациях выросло на 40%, что значительно снизило риски компрометации учетных данных. Практическая значимость таких подходов подтверждается их способностью не только реагировать на угрозы, но и предотвращать их на ранних стадиях.

В условиях цифровизации экономики информационные технологии становятся одной из главных опор в ее ускоренном развитии. Инновационное развитие предполагает как доступность новейших информационных технологий, так и их непрекращающееся усложнение. Сегодня мы вошли в эпоху глобальной цифровизации жизнедеятельности индивида. Не использовать цифровые сервисы уже практически невозможно. Они охватили почти все сферы от проведения банковских платежей до обеспечения общественной безопасности [1]. Но со стремительным проникновением таких технологий в жизнь индивида увеличивается количество персональной информации, которая собирается и анализируется операторами. Поэтому особое внимание необходимо уделять обеспечению кибербезопасности. Без нее ценность любых современных технологий девальвируется, а экономический эффект от их применения стремится к нулю. Поэтому кибербезопасность сегодня стала важным элементом в государственном управлении с последующим ее каскадированием на коммерческие и некоммерческие организации.

Цифровая экономика характеризуется повсеместным внедрением информационных технологий. В финансовом секторе они приобретают особое значение. Ведь большинство услуг, оказываемых финансовыми организациями, невозможно без представления пользователем полной информации о себе. Ярким примером является страхование жизни, где помимо сведений о своих документах клиент предоставляет организации информацию о состоянии своего здоровья [5]. Третьи лица могут использовать эти данные для совершения мошеннических операций. Поэтому обеспечение кибербезопасности становится важным фактором при цифровой трансформации [2]. Киберугрозы стали одним из глобальных вызовов настоящего времени. Мошенники активно используют современные технологии

для того, чтобы завладеть денежными средствами граждан. Появляются новые виды мошенничества.

Фишинговые методы - одни из самых распространенных видов мошенничества в сети Интернет. Коммуницируя с человеком посредством переписки по электронной почте или в мессенджерах, злоумышленник пытается выдать себя за представителя официальной организации, чтобы получить конфиденциальную информацию о человеке и далее завладеть его денежными средствами. Наиболее распространены массовые рассылки по электронной почте, они получили название «Нигерийские письма», потому что на ранних стадиях их использования мошенники выдавали себя за крупного экс-чиновника из Нигерии, которому необходимо получить доступ к своим средствам, размещенным в иностранном банке, а ввиду отсутствия у него сейчас возможности оплатить необходимые сборы, он готов поделиться частью своих средств с получателем письма (суммы называются как правильно внушительные: от нескольких десятков до миллионов долларов США). Чтобы принять его предложение достаточно перевести необходимую ему сумму по указанным в письме реквизитам. После получения денежных средств мошенник прерывает коммуникацию.

Другой распространенный вид кибермошенничества - рассылка программ, содержащих вредоносный код. Устанавливая такое программное обеспечение, пользователь предоставляет злоумышленнику доступ к своей конфиденциальной информации, а в ряде случаев - и напрямую к банковским счетам. Такой способ применяется как для осуществления атак на персональные компьютеры, так и на смартфоны. DDOS-атаки осуществляются на онлайн-сервисы крупных организаций. Из-за них владелец ресурса не может осуществлять свою персональную деятельность, что приводит к реализации финансовых и репутационных рисков. Значительная часть потребителей сегодня предпочитает приобретать товары онлайн, поэтому постоянные подобные атаки могут привести к прекращению деятельности организации. Зачастую мошенники предлагают прекратить совершать DDOS-атаки, получив вознаграждение [4]. Кибершпионаж используется для получения корпоративных или государственных закрытых данных, которые в дальнейшем мошенник использует в своих корыстных интересах. Так могут быть украдены технологические разработки, стратегические документы и другие объекты интеллектуальной собственности. Также мошенники взламывают базы данных с помощью SQL-инъекций. Таким образом они получают доступ к логину и паролям пользователей и к другим персональным данным. В условиях цифровизации кибербезопасность стала неотъемлемой частью инфраструктуры почти любого коммерческого предприятия вне зависимости от масштабов его деятельности и финансовых показателей [8]. Больше всего подвергаются атакам злоумышленников следующие сферы:

- финансы – банки, брокерские и инвестиционные компании, страховщики, платежные системы;
- энергетика – компании-поставщики электроэнергии, топлива, газа;
- промышленность – машиностроение, автомобилестроение, производство транспортной техники;
- телекоммуникационные компании – провайдеры связи и интернета, онлайн-сервисы;
- в сфере государственного сервиса – сайты различных ведомств и учреждений;
- в образовании – вузы, научно-исследовательские институты.

Кибератаки способны подорвать репутацию предприятий и ведут к следующим последствиям:

1. Получение мошенниками конфиденциальной информации о клиентах и сотрудниках.
2. Прерывание деятельности организации и вывод из строя телекоммуникационной и информационной инфраструктуры.
3. Шифрование информации с целью последующего вымогательства. Мошенник высылает необходимые для расшифровки данные только после получения денежного

вознаграждения. При этом данный процесс может проходить в несколько итераций, каждая из которых будет сопровождаться повышением стоимости за расшифровку.

4. Кража денежных средств. Мошенники ищут уязвимости в программном обеспечении компании и используют найденные несовершенства для перевода денег на свои счета. Зачастую такая деятельность ведется из-за границы, и отследить движение денежных средств в короткий срок не представляется возможным.

Основной целью большинства кибератак является не прямое получение денежных средств, а кража персональных данных граждан, нарушение работы информационных систем, промышленный шпионаж. Как следствие всего этого, уже и происходит получение денежных средств. В 2023 году было зафиксировано более 900 тысяч хакерских атак на российские компании. Наиболее часто им подвергались банки, медицинские и государственные учреждения. За пять лет наиболее привлекательным объектом для атак злоумышленников стали медицинские учреждения. Большая часть кибератак направлена именно на частных лиц. Во многом это объясняется тем, что на уровне предприятий, особенно крупного бизнеса создаются и постоянно совершенствуются сложные системы защиты. Такая деятельность выделяется в отдельное стратегическое направление деятельности предприятия и контролируется на уровне высшего менеджмента, и такие организации обладают несравненно большими финансовыми и техническими возможностями защиты информации, в то время как частные граждане ограничены в выборе средств защиты.

Самым эффективным способом собственной защиты от киберугроз для граждан является внимательное отношение к собственным персональным данным, особенно при использовании онлайн-сервисов, и регулярное обновление антивирусных программ на личных устройствах. При этом сегодня мошенники все чаще используют методы социальной инженерии, чтобы заполучить необходимую для совершения своих действий информацию. Используя методы психологического давления, они входят в доверие к гражданам под видом финансовых организаций, правоохранительных или государственных надзорных органов. Также в особом спектре внимания кибермошенников находятся субъекты малого и среднего предпринимательства, в том числе на предприятии. Это объясняется рядом причин:

1. Непонимание важности обеспечения кибербезопасности. Происходит это из-за недостаточной информированности. Поэтому руководство таких предприятий склонно выбирать неэффективные методы защиты или же вообще игнорировать их применение.

2. Отсутствие финансовых возможностей для внедрения современных систем защиты. Подобные технологические решения требуют значительных средств, это уменьшает оборотные средства предприятия, что может привести к финансовым показателям и привести к реализации определенных рисков.

3. Недостаток технических мощностей. Системы защиты от кибермошенничества требуют достаточно высоких вычислительных мощностей и дорогостоящего оборудования, что на уровне малого и среднего предпринимательства является заградительным барьером.

4. Отсутствие политик безопасности. Они представляют собой набор правил, уставов, имеющих техническую реализацию, которые предприятие использует для обеспечения безопасности. Многие малые и средние предприятия их не имеют или используют в довольно общем виде, что объясняется отсутствием в организационной структуре обособленных подразделений с такими компетенциями.

5. Непонимание сотрудниками основ кибербезопасности. Человеческий фактор нельзя исключать. Эффективное обеспечение кибербезопасности - навык, который можно получить, пройдя специальное обучение. Его организация требует временных и финансовых ресурсов. В то время как в большинстве случаев административный персонал имеет доступ к конфиденциальным данным [11].

Решение этих вопросов должны иметь комплексный характер. Каждый из вышеперечисленных пунктов напрямую взаимосвязан с остальными, поэтому выбирая решения по

обеспечению кибербезопасности субъектам малого и среднего бизнеса необходимо выбирать системные подходы, захватывая все аспекты. Иначе сложно сделать вывод об эффективной киберзащите предприятия. В России на государственном уровне осознается критическая важность развития методов и систем противодействия киберугрозам, что отражено в принятой в 2023 году Доктрине информационной безопасности, утвержденной Указом Президента. Этот документ не только закрепляет ключевые понятия в области кибербезопасности, но и определяет стратегические подходы, направления и методы ее обеспечения. Среди стратегических целей выделяются защита киберпространства РФ, обеспечение суверенитета, укрепление обороноспособности, поддержание стабильности политической и социальной систем, сохранение территориальной целостности и защита конституционных прав граждан [9].

Для реализации этих целей Доктрина предлагает конкретные стратегии, такие как:

1. Развитие национальной инфраструктуры киберзащиты через создание централизованных систем мониторинга и реагирования на киберинциденты, включая Государственную систему обнаружения, предупреждения и ликвидации последствий компьютерных атак (ГосСОПКА). Например, в 2023 году ГосСОПКА обработала более 500 тысяч инцидентов, из которых 70% были нейтрализованы на стадии обнаружения;
2. Совершенствование нормативно-правовой базы, что подразумевает внедрение строгих стандартов защиты данных и ответственности за киберпреступления, а также гармонизацию законодательства с международными нормами;
3. Стимулирование государственно-частного партнерства, направленного на обмен опытом и технологиями между государственными органами и бизнесом. Примером служит сотрудничество ФСБ и «Ростелекома» в разработке систем защиты критической инфраструктуры;
4. Повышение киберграмотности населения и специалистов через образовательные программы, такие как курсы ДГТУ по кибербезопасности, и кампании, что снижает влияние человеческого фактора.

Эти стратегии подкрепляются деятельностью таких ведомств, как ФСБ, МВД и Центральный банк РФ, которые внедряют инструменты анализа угроз на основе ИИ и технологии шифрования нового поколения. Так, Центральный банк в 2023 году обязал банки использовать системы IDS, что сократило число атак на финансовые организации на 20%. Таким образом, Доктрина задает системный подход, ориентированный на превентивные меры и повышение устойчивости к кибератакам. Сегодня основными субъектами и акторами, обеспечивающими кибербезопасность в России являются служащие государственных органов разного уровня, в чьи должностные компетенции входит данная сфера. Среди организаций, активно развивающих эту сферу, можно выделить МВД, Генеральную прокуратуру, Роскомнадзор, Следственный комитет, ФСБ, ЦБ РФ. Данные субъекты наделены специальными полномочиями и имеют в своем распоряжении правовые, технические, организационные, розыскные и иные возможности и полномочия.

Обсуждение результатов. Необходимо определить ряд методов, ведущих к повышению эффективности защитных мероприятий на предприятии:

1. Использование и постоянное развитие (усложнение) применяемых технических средств и технологических решений.
2. Повышение уровня образования специалистов и развитие кадрового потенциала. Здесь необходимо расширять и углублять программы высшего образования, а также регулярно проводить актуализацию программ дополнительного образования с уклоном на последующее прикладное применение знаний.
3. Непрерывная актуализация нормативной базы с учетом ее практического применения, устранение пробелов в законодательстве и приведении законодательной базы в соответствие с потребностями основных акторов.

4. Применение современных методов оперативно-розыскной деятельности.
5. Создание институтов координации деятельности по противодействию кибермошенничеству на государственном уровне, а также организация возможности оперативного обмена данными между основными субъектами данной отрасли.
6. Масштабирование успешных практик обеспечения кибербезопасности по стране, поиск возможности их каскадирования от крупных организаций к малым [10, 11].
7. Научно-исследовательское обеспечение этой деятельности позволяет определять подходы, снижающие стоимость внедряемых технологий и необходимого оборудования без потери их эффективности [12].
8. Проведение комплексных исследований проблем кибербезопасности, и разработка программ повышения киберграмотности в условиях ограниченных ресурсов.

Мошенники используют различные методы, чтобы достичь своей главной цели - хищения денежных средств. Большинство мошеннических схем направлено на хищение конфиденциальных сведений и персональных данных. Процесс углубления цифровизации будет создавать дополнительные риски, связанные с применением мошенниками современных технологий. Однако развитие инновационных технологий совместно с повышением уровня информированности граждан и развитием образовательных программ способны привести к радикальному снижению деятельности злоумышленников. Именно поэтому, обеспечение кибербезопасности - неотъемлемый элемент цифровизации экономики [6].

Анализ текущего состояния кибербезопасности в России показывает, что проблема защиты от киберугроз становится все более актуальной. Наиболее уязвимыми остаются медицинские учреждения, в которых хранится большая часть персональных данных граждан, а также субъекты малого и среднего бизнеса, у которых часто отсутствуют ресурсы для обеспечения адекватной защиты. Выявленные причины, такие как недостаток знаний, ограниченные финансовые возможности и отсутствие специализированных политик безопасности, указывают на необходимость комплексного подхода к решению вопросов кибербезопасности. Ключевым аспектом является понимание важности киберзащиты не только на уровне предприятий, но и среди частных лиц. В связи с этим рекомендовано проводить регулярные тренинги и повышать осведомленность о киберугрозах, а также использовать доступные технологии защиты информации. На государственном уровне ключевым шагом в обеспечении кибербезопасности стало принятие Доктрины информационной безопасности в 2023 году, которая четко формулирует цели и приоритеты в области киберзащиты, включая защиту национального киберпространства и минимизацию внешних угроз. Однако для повышения эффективности существующих методов требуется их развитие через реализацию конкретных стратегий:

1. Модернизация технических средств защиты – внедрение систем на основе ИИ для анализа больших данных и прогнозирования кибератак, а также использование квантовых технологий шифрования. Например, в 2023 году «Лаборатория Касперского» внедрила ИИ-решения для 300 российских компаний, что сократило время обнаружения угроз до 5 минут.
2. Развитие кадрового потенциала – создание образовательных программ в вузах, таких как ДГТУ и ДГУ, и проведение учений по отражению кибератак. В 2023 году более 500 специалистов прошли подготовку в рамках программы «Киберполигон», что повысило их готовность к реальным инцидентам.

Совершенствование нормативной базы – разработка стандартов для защиты информации в отраслях и обязательная сертификация систем киберзащиты. Например, введение ГОСТ Р 57580.1-2017 для банков увеличило их устойчивость к атакам на 35%. Создание координирующих институтов – формирование межведомственных центров, таких как расширенная сеть ГосСОПКА, для оперативного обмена данными между государством, бизнесом и научным сообществом. В 2023 году ГосСОПКА координировала действия 150 организаций, предотвратив ущерб на сумму более 10 млрд рублей. Эти меры дополняются

масштабированием региональных практик и интеграцией отечественных решений, таких как системы «Код Безопасности», что снижает зависимость от зарубежных технологий. Такой подход не только повышает устойчивость к киберугрозам, но и обеспечивает устойчивое развитие цифровой экономики России, сокращая число успешных атак (в 2023 году их число снизилось на 12% по данным Роскомнадзора).

Вывод. Анализ текущего состояния кибербезопасности в России показывает, что проблема защиты от киберугроз требует системного подхода, что подчеркивает необходимость внедрения описанных стратегий. Их реализация, включая проактивную защиту, адаптивные системы и «нулевое доверие», уже демонстрирует результаты: внедрение ГосСОПКА и MFA сократило ущерб от атак на 18% за год. Для дальнейшего прогресса важно сочетать технические инновации с повышением киберграмотности и координацией усилий всех участников, что обеспечит безопасность как отдельных организаций, так и экономики в целом.

Библиографический список:

1. Вагапов С.В., Сергалина Л.А., Хасанов И.И. Современное состояние цифровизации банковского сектора российской федерации // Актуальные вопросы права, экономики и управления. Сборник материалов VI Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием. Чебоксары, 2024. С. 98-99.
2. Вахрушев Д.С., Липовская Н.И. Особенности формирования и основные черты рынка услуг по обеспечению кибербезопасности на современном этапе // Вестник Тверского государственного университета. Серия: Экономика и управление. 2019. № 3. С. 162-168.
3. Кобец П.Н. Повышение уровня ИТ безопасности на основе совершенствования защищенности информационных систем и информационных данных // Актуальные проблемы науки и образования в условиях современных вызовов (шифр - МКАП 30). Сборник материалов XXX Международной научно-практической конференции. Москва, 2024. С. 283-293.
4. Ноговицын М.А. Подходы к формированию модели цифровой трансформации российской экономики в условиях глобальных вызовов // Экономика и управление. 2023. Т. 29. № 1. С. 101-114.
5. Оборин М.С. Экономическая безопасность промышленных предприятий в условиях цифровой экономики // Вестник Самарского государственного экономического университета. 2022. № 1(207). С. 44-54.
6. Обухова А.С., Пияльцев А.И. Киберпреступления и кибербезопасность в банковском секторе: понятие и современные угрозы Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Экономика. Социология. Менеджмент. 2020. Т. 10. № 6. С. 42-51.
7. Полякова Т.А. Развитие системы информационного права в условиях цифровой трансформации: приоритетные направления, проблемы и тенденции // Право.ру. 2019. № 5 (61). С. 112-118.
8. Ровенская А.В., Воробьева Е.Ю. К вопросу обеспечения экономической безопасности в условиях развития цифровой экономики // ЭФО: Экономика. Финансы. Общество. 2023. № 1 (5). С. 102-114.
9. Ронжина Н.А., Глазатов А.А. Развитие системы кибербезопасности в Российской Федерации как основное условие обеспечения национальной информационной безопасности // Право. Безопасность. Чрезвычайные ситуации. 2023. № 1 (58). С. 24-34.
10. Сухина Н.Ю., Якушева А.А., Березина А.И. Основные проблемы, перспективы и финансовые аспекты обеспечения развития системы кибербезопасности в РФ // Лучшая научно-исследовательская работа 2018. сборник статей XIII Международного научно-практического конкурса. 2018. С. 95-98.
11. Шкодинский С.В., Дудин М.Н., Усманов Д.И. Анализ и оценка киберугроз национальной финансовой системе России в цифровой экономике // Финансовый журнал. 2021. Т. 13. № 3. С. 38-53.
12. Шмидт А.Э., Гуськов П.О., Голубовская С., Ручин К.В., Николаев А.А. Роль информационных систем и технологий в цифровой экономике: перспективы и проблемы для компаний и государства // Финансовая экономика. 2023. № 5. С. 137-140.

References:

1. Vagapov S.V., Sergalina L.A., Khasanov I.I. The current state of digitalization of the banking sector of the Russian Federation. Topical issues of law, economics and management. Collection of materials of the VI All-Russian scientific and practical conference of students, postgraduates and young scientists with international participation. Cheboksary, 2024; 98-99. (In Russ)
2. Vakhrushev D.S., Lipovskaya N.I. Features of the formation and main features of the cybersecurity services market at the present stage. *Bulletin of Tver State University. Series: Economics and Management*. 2019; 3:162-168. (In Russ)

3. Kobets P.N. Improving the level of it security based on improving the security of information systems and information data. Actual problems of science and education in conditions of modern challenges (МКАР 30). Collection of materials of the XXX International Scientific and Practical Conference. Moscow, 2024;283-293.
4. Nogovitsyn M.A. Approaches to the formation of a model of digital transformation of the Russian economy in the context of global challenges. *Economics and management*. 2023; 29(1):101-114 (In Russ)
5. Oborin M.S. Economic security of industrial enterprises in the digital economy. *Bulletin of the Samara State University of Economics*. 2022;1(207):44-54. (In Russ)
6. Obukhova A.S., Piyaltsev A.I. Cybercrime and cybersecurity in the banking sector: the concept and modern threats Proceedings of the Southwestern State University. *Series: Economics. Sociology. Management*. 2020;10(6): 42-51. (In Russ)
7. Polyakova T.A. Development of the information law system in the context of digital transformation: priority areas, problems and trends. *Pravo.by*. 2019;5(61):112-118. (In Russ)
8. Rovenskaya A.V., Vorobyova E.Yu. On the issue of ensuring economic security in the context of the development of the digital economy. *EFO: Economics. Finance. Society*. 2023;1(5):102-114. (In Russ)
9. Ronzhina N.A., Glazatov A.A. Development of the cybersecurity system in the Russian Federation as the main condition for ensuring national information security. *Right. Safety. Emergency situations*. 2023;1(58):24-34. (In Russ)
10. Sukhina N.Yu., Yakusheva A.A., Berezina A.I. The main problems, prospects and financial aspects of ensuring the development of the cybersecurity system in the Russian Federation. The best research work 2018. collection of articles of the XIII International scientific and practical competition. 2018;95-98. (In Russ)
11. Shkodinsky S.V., Dudin M.N., Usmanov D.I. Analysis and assessment of cyber threats to the national financial system of Russia in the digital economy. *Financial Journal*. 2021;13(3):38-53. (In Russ)
12. Schmidt A.E., Guskov P.O., Golubovskaya S., Ruchin K.V., Nikolaev A.A. The role of information systems and technologies in the digital economy: prospects and problems for companies and the state. *Financial Economics*. 2023;5:137-140. (In Russ)

Сведения об авторах:

Гюльханум Ибадулаховна Качаева, кандидат экономических наук, доцент, заведующая кафедрой информационной безопасности и программной инженерии; providetc@mail.ru
Нариман Гарунович Султанов, студент, nariman.sultanov05@mail.ru

Information about authors:

Gulhanum I. Kachaeva, Cand. Sci. (Econom.), Assoc. Prof., Head of the Department of Information Security and Software Engineering; providetc@mail.ru
Nariman G. Sultanov, Student, nariman.sultanov05@mail.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/ Received 09. 03.2025.

Одобрена после рецензирования / Reviced 27.04.2025.

Принята в печать /Accepted for publication 11.05.2025.

**Комбинирование систем распознавания и отслеживания аномальных объектов
в телекоммуникационных системах**

Д.А. Крюкова, С.Д. Шибайкин, В.В. Никулин, С.Р. Байбикова, Н.О. Сурков, В.Ю. Козьяйкин
Национальный исследовательский Мордовский государственный университет
им. Н.П. Огарёва,
430005, г.Саранск, Большевистская ул., 68, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является интеграция алгоритмов YOLO и CSRT для автоматизированного распознавания и отслеживания объектов в видеопотоке. Акцентируется внимание на проблемах, связанных с растущим объемом видеоданных и необходимостью эффективной идентификации аномальных объектов в системах осуществляющих контроль безопасности. **Метод.** Исследование основано на методах имитационного компьютерного моделирования и алгоритмах. **Результат.** Определены ключевые особенности каждого алгоритма, их преимущества и недостатки. Представлены результаты экспериментальных тестов, основанных на анализе видеопотоков с разнообразными сценариями движения объектов, которые показывают сокращение времени обработки кадров при высокой точности распознавания. Доказана возможность дальнейшего улучшения системы автоматизированного распознавания и отслеживания, в частности, добавление функции прогнозирования движения объектов, что позволит повысить её эффективность и расширить область применения в задачах видеонаблюдения и безопасности. **Вывод.** Интеграция алгоритмов позволяет достигать значительных улучшений в реальном времени, что особенно важно в контексте видеонаблюдения и обеспечения безопасности. Добавление функции прогнозирования движения объектов не только увеличит функциональность системы, но и сделает её более адаптивной к динамичным условиям, что крайне важно для предотвращения потенциальных угроз.

Ключевые слова: компьютерное зрение; видеонаблюдение; алгоритм распознавания; алгоритм отслеживания; YOLO; CSRT; прогнозирование

Для цитирования: Д.А. Крюкова, С.Д. Шибайкин, В.В. Никулин, С.Р. Байбикова, Н.О. Сурков, В.Ю. Козьяйкин. Комбинирование систем распознавания и отслеживания аномальных объектов в телекоммуникационных системах. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025;52(2):116-121. DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-2-116-121

Combination of systems for recognition and tracking of anomalous objects in telecommunication systems

D.A. Kryukova, S.D. Shibaikin, V.V. Nikulin, S.R. Baibikova, N.O. Surkov, V. Yu. Kozyaykin
N.P. Ogarev National Research Mordovian State University,
68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russia

Abstract. Objective. The aim of the study is to integrate the YOLO and CSRT algorithms for automated recognition and tracking of objects in a video stream. The focus is on the problems associated with the growing volume of video data and the need for efficient identification of anomalous objects in security control systems. **Method.** The study is based on computer simulation methods and algorithms. **Result.** The key features of each algorithm, their advantages and disadvantages are defined. The results of experimental tests based on the analysis of video streams with various scenarios of object movement are presented, which show a reduction in frame processing time with high recognition accuracy. The possibility of further improvement of the automated

recognition and tracking system is proven, in particular, adding the function of predicting the movement of objects, which will increase its efficiency and expand the scope of application in video surveillance and security tasks. **Conclusion.** Integration of algorithms allows achieving significant improvements in real time, which is especially important in the context of video surveillance and security. Adding the function of predicting the movement of objects will not only increase the functionality of the system, but also make it more adaptive to dynamic conditions, which is extremely important for preventing potential threats.

Keywords: computer vision; video surveillance; recognition algorithm; tracking algorithm; YOLO; CSRT; forecasting

For citation: D.A. Kryukova, S.D. Shibaikin, V.V. Nikulin, S.R. Baibikova, N.O. Surkov, V.Yu. Kozyaykin. Combination of systems for recognition and tracking of anomalous objects in telecommunication systems. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2025;52(2):116-121. (In Russ) DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-2-116-121

Введение. С увеличением объема видеоданных и расширением сфер их применения растет потребность в эффективных методах автоматического распознавания и отслеживания объектов в реальном времени. Возможности человека ограничены при необходимости одновременного контроля множества видеокамер с целью обеспечения безопасности. В таких условиях на первый план выходят автоматизированные системы, способные ускорить процесс мониторинга и обеспечить идентификацию аномальных объектов.

Постановка задачи. Разработка и внедрение таких автоматизированных систем становится сегодня актуальной задачей. Эти системы могут быть внедрены в различные области, такие как контроль безопасности на транспортных узлах (аэропорты, вокзалы), городское видеонаблюдение и периметровая защита критически важных объектов. Внедрение таких технологий позволяет оперативно реагировать на угрозы и обеспечивать высокий уровень безопасности.

Методы исследования. Для разработки системы автоматизированного распознавания и отслеживания объектов были выбраны два алгоритма: алгоритм обнаружения объектов на изображении YOLO (далее YOLO) [1] и алгоритм детектирования CSRT (далее CSRT) [2]. При выборе алгоритма распознавания также рассматривался MobileNet SSD [3], однако предпочтение было отдано YOLO. Особенность алгоритма YOLO заключается в том, что вместо многократного сканирования отдельных областей изображения, как это происходит в большинстве подходов, основанных на свёрточных нейронных сетях (CNN), YOLO анализирует изображение целиком за один проход.

Сравнивая с MobileNet SSD, следует отметить, что алгоритм оптимизирован для работы на мобильных устройствах с ограниченными вычислительными ресурсами и демонстрирует хорошую производительность при задачах классификации, но его архитектура менее эффективна для обнаружения объектов в реальном времени. YOLO достигает точности 57,9 % (mAP@0.5), в то время как MobileNet SSD – лишь 22,2 % (mAP@0.5). Хотя YOLO обрабатывает меньшее количество кадров в секунду, чем MobileNet SSD, алгоритм значительно превосходит его по точности. Это делает YOLO более предпочтительным для задач, где важна высокая точность распознавания объектов. Кроме того, YOLO позволяет распознавать несколько объектов одновременно, что делает его более подходящим для поставленных задач.

Алгоритм отслеживания CSRT (Channel and Spatial Reliability Tracker) в ходе исследования сравнивался с другими алгоритмами библиотеки OpenCV, такими как KCF, TLD, MIL, Boosting и Median [4], что подтвердило его преимущества в высокой точности и устойчивости при отслеживании объектов, особенно в условиях частичной окклюзии или полного перекрытия объекта. CSRT способен сохранять стабильность при изменении положения или масштаба объекта, что делает его надежным инструментом при долгосрочном трекинге объектов, особенно когда объекты могут исчезать из поля зрения камеры и снова появляться [5]. Для наглядного сравнения эффективности алгоритмов был составлен график

обработки кадров (рис. 1), на котором представлены результаты работы алгоритмов распознавания и отслеживания [6]. Данные на графике демонстрируют время обработки каждого алгоритма, что позволяет визуальнo оценить их производительность.

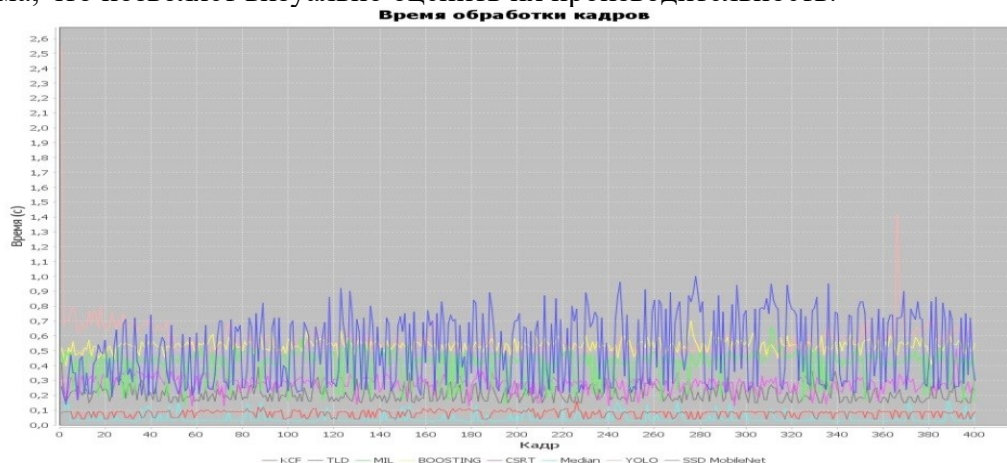


Рис. 1 – График сравнительного анализа обработки кадров алгоритмов распознавания и детектирования

Fig. 1 – Graph of comparative analysis of frame processing of recognition and detection algorithms

Интеграция алгоритмов YOLO и CSRT направлена на создание системы, которая минимизирует задержки в процессе обнаружения и отслеживания объектов [7]. Использование YOLO как отдельного алгоритма приводит к более длительному времени обработки, особенно при динамическом видеопотоке. Однако при его сочетании с CSRT общая эффективность системы значительно повышается. В ходе работы системы YOLO отвечает за начальное выявление объекта в кадре, после чего CSRT выполняет его отслеживание [8]. Такой подход исключает необходимость постоянного обращения к YOLO для уточнения положения объекта, что, в свою очередь, сокращает время отклика и снижает нагрузку на вычислительные ресурсы. Интеграция данных алгоритмов не только ускоряет обработку данных, но и делает отслеживание более точным и стабильным. На графике (рис. 2) наглядно видно, что YOLO требует больше времени на обработку кадров по сравнению с CSRT.

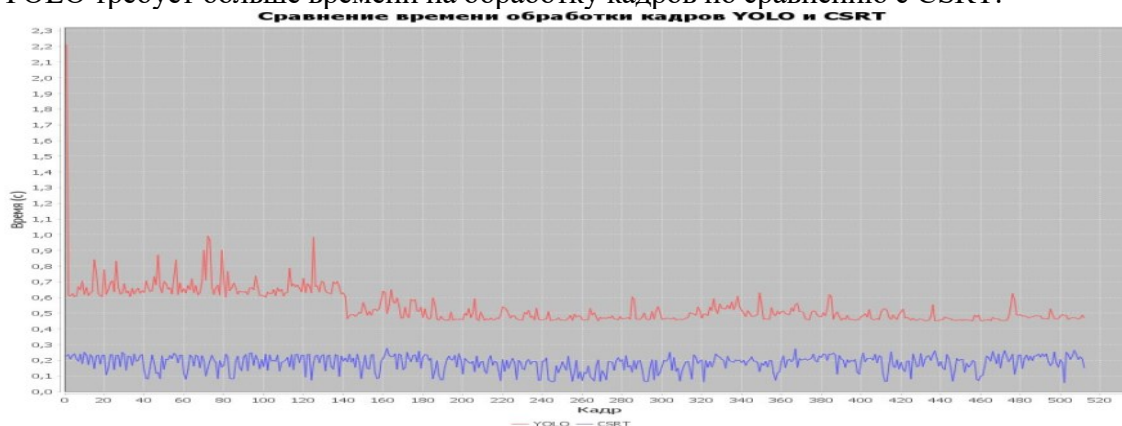


Рис. 2 – График сравнительного анализа обработки кадров алгоритмов YOLO и CSRT

Fig. 2 – Graph of comparative analysis of frame processing of YOLO and CSRT algorithms

Комбинированное использование позволяет системе эффективно использовать преимущества каждого из алгоритмов: YOLO – для первоначального обнаружения, а более быстрого CSRT – для дальнейшего отслеживания, что сокращает общее время отклика системы.

Обсуждение результатов. Для оценки эффективности интегрированной системы была проведена экспериментальная проверка на подготовленном датасете (рис. 3), в ходе которой анализировался видеопоток с разнообразными сценариями движения объекта.

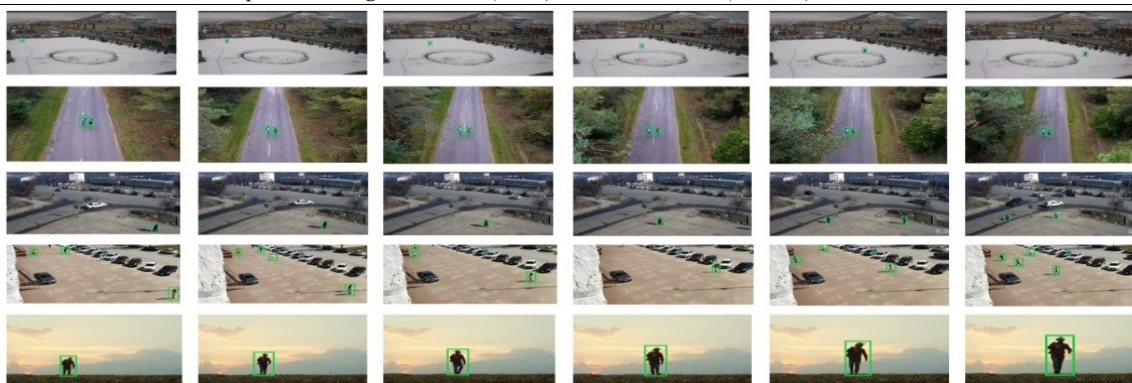


Рис. 3 – Датасет для экспериментальной проверки

Fig. 3 – Dataset for experimental testing

В ходе эксперимента было зафиксировано среднее время обработки кадров для системы с использованием алгоритма YOLO в комбинации с CSRT [9]. Результаты показали, что среднее время обработки одного кадра составило примерно 45 миллисекунд, что обеспечивает возможность обработки до 22 кадров в секунду. В сравнении с использованием только YOLO, где среднее время обработки достигало 70 миллисекунд на кадр, интеграция с CSRT позволила существенно сократить задержки, что важно для задач реального времени. Интегрированная система, которая включает в себя функции определения объектов и их отслеживания, имеет значительный потенциал для дальнейшего улучшения [10]. Одной из ключевых возможностей является добавление функции прогнозирования движения объектов. Это позволит системе не только идентифицировать и отслеживать объекты, но и предсказывать их возможные направления движения.

С использованием алгоритмов машинного обучения и статистических методов, система сможет анализировать предыдущие траектории объектов и на основе полученных данных предсказывать их вероятное поведение в будущем [11]. Например, если человек (рис. 4) или транспортное средство (рис. 5) движется в определённом направлении, система будет способна заранее указывать возможные траектории, что может быть крайне полезно в ситуациях, требующих оперативного реагирования.



Рис. 4 – Прогнозирование движения человека

Fig. 4 – Predicting human movement

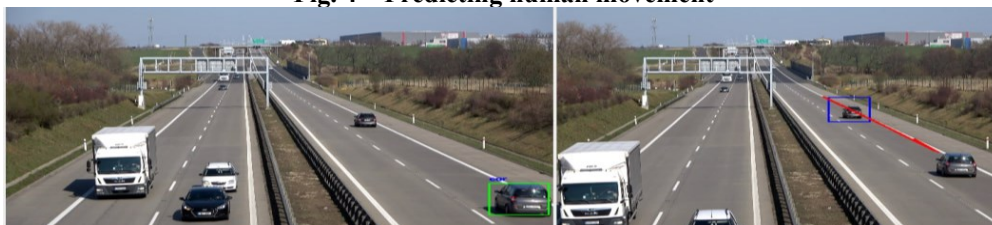


Рис. 5 – Прогнозирование движения транспортного средства

Fig. 5 – Vehicle movement prediction

Вывод. В данной работе представлена интеграция алгоритмов YOLO и CSRT для создания эффективной системы автоматизированного распознавания и отслеживания аномальных объектов в видеопотоке. Экспериментальные результаты подтвердили, что интеграция позволяет достигать значительных улучшений в реальном времени, что особенно важно в контексте видеонаблюдения и обеспечения безопасности. Предложенный подход

открывает новые перспективы для дальнейшего развития системы, включая возможность добавления модуля прогнозирования движения объектов. Это дополнение не только увеличит функциональность системы, но и сделает её более адаптивной к динамичным условиям, что крайне важно для предотвращения потенциальных угроз.

Результаты исследования подчеркивают важность использования комбинированных методов в области компьютерного зрения. Дальнейшие разработки в этом направлении могут привести к созданию более совершенных и надежных систем мониторинга.

Библиографический список:

1. URL:www.researchgate.net/publication/376777967_Pepper_Target_Recognition_and_Detection_Based_on_Improved_YOLO_v4. Tan, Zhiyuan & Chen, Bin & Sun, Liying & Xu, Huimin & Zhang, Kun & Chen, Feng. Pepper Target Recognition and Detection Based on Improved YOLO v4. // Information Technology and Control, 2023, № 12.
2. Farhadov, Xurshedjon & Lee, Suk-Hwan & Kwon, Ki-Ryong. Object Tracking using CSRT Tracker and RCNN// 7th International Conference on Bioimaging. 2020. 209-212.
3. Islam, Shahab & Ferraioli, Giampaolo & Pascasio, Vito & Vitale, Sergio & Amin, Muhammad. Performance Analysis of YOLOv3, YOLOv4 and MobileNet SSD for Real Time Object Detection // ResearchGate, 2024, № 6. – URL: www.researchgate.net/publication/381851712_Performance_Analysis_of_YOLOv3_YOLOv4_and_MobileNet_SSD_for_Real_Time_Object_Detection. 37-49.
4. Fang, Cheng & Huang, Jun duan & Cuan, Kaixuan & Zhang, Xiaolin & Zhang, Tiemin. Comparative study on poultry target tracking algorithms based on a deep regression network. // Biosystems Engineering, 2020. – URL: www.sci-hub.ru/10.1016/j.biosystemseng.2019.12.002 .
5. Шибайкин, С.Д. Проблемы построения оптического потока динамических изображений / С.Д. Шибайкин // Фундаментально-прикладные проблемы безопасности, живучести, надежности, устойчивости и эффективности систем : Материалы III международной научно-практической конференции, посвящённой 110-летию со дня рождения академика Н. А. Пилюгина, Елец, 03–05 июня 2019 года. Том Часть I. – Елец: Елецкий государственный университет им. И. А. Бунина, 2019. – С. 81-88.
6. Guan, X. & Song, B. & Li, Z.. Comparison of the CSRT and the CST parameterization methods. Kongqi Donglixue Xuebao // Acta Aerodynamica Sinica. 32. 2014. 228-234.
7. Geng, Lei & Yang, Wenzhu & Jiao, Yanyan & Zeng, Shuang & Chen, Xinting. A multilayer human motion prediction perceptron by aggregating repetitive motion. // Machine Vision and Applications. 2023. 34.
8. Шибайкин С.Д., Д.А. Крюкова, Д.А. Балыков, М.И. Шепелев, О.Е. Шумаров Исследование применения алгоритмов трекинга для определения и прогнозирования девиантного поведения // Научно-технический вестник Поволжья. 2023. №12. С. 635 - 638.
9. Mohit Phadtare, Varad Choudhari, Rushal Pedram and Sohan Vartak. Comparison between YOLO and SSD Mobile Net for Object Detection in a Surveillance Drone // IJSREM, 2021. – URL: www.researchgate.net/publication/355336797_Comparison_between_YOLO_and_SSD_MobileNet_for_Object_Detection_in_a_Surveillance_Drone.
10. www.researchgate.net/publication/344247798_Single_Object_Trackers_in_OpenCV_A_Benchmark.Adnan Brdjanin, Amila Akagic, Džemil Džigal, Nadja Dardagan. Single Object Trackers in OpenCV: A Benchmark // ResearchGate, 2020.
11. www.researchgate.net/publication/355222855_Multiple_Object_Trackers_in_OpenCV_A_Benchmark.Nadja Dardagan, Adnan Brdjanin, Džemil Džigal, Amila Akagic. Multiple Object Trackers in OpenCV: A Benchmark // ResearchGate, 2021.

References:

1. URL:www.researchgate.net/publication/376777967_Pepper_Target_Recognition_and_Detection_Based_on_Improved_YOLO_v4. Tan, Zhiyuan & Chen, Bin & Sun, Liying & Xu, Huimin & Zhang, Kun & Chen, Feng. Pepper Target Recognition and Detection Based on Improved YOLO v4. Information Technology and Control, 2023;12.
2. Farhadov, Xurshedjon & Lee, Suk-Hwan & Kwon, Ki-Ryong. Object Tracking using CSRT Tracker and RCNN. 7th International Conference on Bioimaging. 2020:209-212.
3. Islam, Shahab & Ferraioli, Giampaolo & Pascasio, Vito & Vitale, Sergio & Amin, Muhammad. Performance Analysis of YOLOv3, YOLOv4 and MobileNet SSD for Real Time Object Detection // ResearchGate, 2024, № 6. – URL: www.researchgate.net/publication/381851712_Performance_Analysis_of_YOLOv3_YOLOv4_and_MobileNet_SSD_for_Real_Time_Object_Detection. 37-49.
4. Fang, Cheng & Huang, Jun duan & Cuan, Kaixuan & Zhang, Xiaolin & Zhang, Tiemin. Comparative study on poultry target tracking algorithms based on a deep regression network. // Biosystems Engineering, 2020. – URL: www.sci-hub.ru/10.1016/j.biosystemseng.2019.12.002 .
5. Shibaikin, S. D. Problems of constructing an optical flow of dynamic images / S. D. Shibaikin // Fundamental and applied problems of safety, survivability, reliability, stability and efficiency of systems: Proceedings of the III international scientific and practical conference dedicated to the 110th anniversary of the birth of

- academician N.A. Pilyugin, Yelets, June 03–05, 2019. Volume Part I. – Yelets: Yelets State University named after I.A. Bunin, 2019:81-88 (In Russ)
6. Guan, X. & Song, B. & Li, Z.. Comparison of the CSRT and the CST parameterization methods. Kongqi Donglixue Xuebao. *Acta Aerodynamica Sinica*. 2014;32:228-234.
 7. Geng, Lei & Yang, Wenzhu & Jiao, Yanyan & Zeng, Shuang & Chen, Xinting. A multilayer human motion prediction perceptron by aggregating repetitive motion. // Machine Vision and Applications. 2023. 34.
 8. Shibaikin S.D., D. A. Kryukova, D. A. Balykov, M. I. Shepelev, O. E. Shumarov Study of the application of tracking algorithms for determining and predicting deviant behavior. *Scientific and Technical Bulletin of the Volga Region*. 2023;12:635 - 638. (In Russ)
 9. Mohit Phadtare, Varad Choudhari, Rushal Pedram and Sohan Vartak. Comparison between YOLO and SSD Mobile Net for Object Detection in a Surveillance Drone//IJSREM, 2021. – URL: www.researchgate.net/publication/355336797_Comparison_between_YOLO_and_SSD_MobileNet_for_Object_Detection_in_a_Surveillance_Drone.
 10. www.researchgate.net/publication/344247798_Single_Object Trackers_in_OpenCV_A_Benchmark.Adnan Brdjanin, Amila Akagic, Džemil Džigal, Nadja Dardagan. Single Object Trackers in OpenCV: A Benchmark // ResearchGate, 2020.
 11. www.researchgate.net/publication/355222855_Multiple_Object Trackers_in_OpenCV_A_Benchmark.Nadja Dardagan, Adnan Brdjanin, Džemil Džigal, Amila Akagic. Multiple Object Trackers in OpenCV: A Benchmark // ResearchGate, 2021.

Сведения об авторах:

Дарья Андреевна Крюкова, магистрант, кафедра инфокоммуникационных технологий и систем связи; darya.kryukova.2302@mail.ru

Сергей Дмитриевич Шибайкин, кандидат технических наук, доцент, кафедра инфокоммуникационных технологий и систем связи; shibaikinsd@mail.ru

Владимир Валерьевич Никулин, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой инфокоммуникационных технологий и систем связи; nikulinvv@mail.ru

Сабина Робертовна Байбикова, магистрант, кафедра инфокоммуникационных технологий и систем связи; sabina.baibikova@yandex.ru

Никита Олегович Сурков, магистрант, кафедра инфокоммуникационных технологий и систем связи; nekitsur@mail.ru

Владислав Юрьевич Козыякин, магистрант, кафедра инфокоммуникационных технологий и систем связи; kozyaykin@yandex.ru

Information about authors:

Daria A. Kryukova, Master's student, Department Infocommunication Technologies and Communication Systems; darya.kryukova.2302@mail.ru

Sergei D. Shibaikin, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Department Infocommunication Technologies and Communication Systems; shibaikinsd@mail.ru

Vladimir.V. Nikulin, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Head of the Department of Infocommunication Technologies and Communication Systems; nikulinvv@mail.ru

Sabina R. Baibikova, Master's student, Department Infocommunication Technologies and Communication Systems; sabina.baibikova@yandex.ru

Nikita O. Surkov, Master's student, Department Infocommunication Technologies and Communication Systems; nekitsur@mail.ru

Vladislav Yu. Kozyaykin, Master's student, Department Infocommunication Technologies and Communication Systems; kozyaykin@yandex.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/ Received 19.11.2024.

Одобрена после рецензирования / Revised 12.01.2025.

Принята в печать /Accepted for publication 10.04.2025.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 004.056.53

DOI: 10.21822/2073-6185-2025-52-2-122-129



Оригинальная статья / Original article

**Защита информационных потоков коммерческого назначения
на промышленном предприятии**

И.А. Лоскутов, С.Е. Акатов

¹Научно-производственная корпорация «Космические системы мониторинга, информаци-
онно-управляющие и электромеханические комплексы имени А.Г. Иосифьяна»

(АО Корпорация «ВНИИЭМ»),

¹107078, г. Москва, ул. Вольная, 30, стр. 10, Россия,

¹Колледж экономики, права и информационных технологий,

¹109029, г. Москва, ул. Нижегородская, 32, стр.16, Россия,

¹МИРЭА - Российский технологический университет,

¹119454, г. Москва, проспект Вернадского, 78, стр.4, Россия,

²ПАО «МАК» «Вымпел»,

²125167, г. Москва, ул. 4 –я Восьмого марта, 3, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является обобщение имеющихся сведений по проблеме обеспечения защиты информации на промышленных предприятиях, работающих исключительно с коммерческой тайной. **Метод.** Методы научного познания, использованные при написании работы: систематизация, анализ, описание, прогноз. **Результат.** Из открытых источников проведен анализ потребности в формировании модели защиты; дан прогноз потенциального ущерба. Сформирована концептуальная модель объекта защиты; сгруппированы входящие подразделения промышленного предприятия по признаку вероятности возникновения компьютерной атаки. Доказана значимость формирования модели защиты, описан процесс формирования организационной структуры промышленного предприятия. **Вывод.** Полученные в работе выкладки позволяют оценить динамику роста ущерба от компьютерной атаки, тем самым доказывая важность подобных исследований. Результаты исследования дают обоснование неоправданности применения некоторых мер с точки зрения защиты информации коммерческого назначения.

Ключевые слова: защита информации, предприятие, коммерческая тайна, промышленность, информационная безопасность, модель защиты информации

Для цитирования: И.А. Лоскутов, С.Е. Акатов. Защита информационных потоков коммерческого назначения на промышленном предприятии. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025;52(2):122-129. DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-2-122-129

Protection of commercial information flows in an industrial enterprise

I.A. Loskutov, S.E. Akatov

¹A.G. Iosifian' Joint Company 'Research and Production Corporation "Space Monitoring Systems, information management and electromechanical complexes",

¹30 Volnaya St., p. 10, Moscow 107078, Russia,

¹College of Economics, Law and Information Technology,

¹32 Nizhegorodskaya St., build.16, Moscow 109029, Russia,

¹MIREA - Russian Technological University,

¹78, Vernadsky Ave., build.4, Moscow 119454, Russia,

²PAO "MAK" "Vympel",

²3, 4th Vosmogo Marta St., Moscow 125167, Russia

Abstract. Objective. The aim of the study is to summarize the available information on the problem of ensuring information security at industrial enterprises working exclusively with commercial secrets. **Method.** The methods of scientific knowledge used in writing the work: systematization, analysis, description, forecast. **Result.** The analysis of the need for forming a protection model was conducted from open sources; a forecast of potential damage was given. A conceptual model of the protected object was formed; the incoming divisions of the industrial enterprise were grouped according to the probability of a computer attack. The importance of forming a protection model was proven, the process of forming the organizational structure of an industrial enterprise and a protection model was described. **Conclusions.** The calculations obtained in the work allow us to estimate the dynamics of damage growth from a computer attack, thereby proving the importance of such studies. The results of the study provide a rationale for the unjustified use of certain measures when considering production from the point of view of protecting commercial information.

Keywords: information protection, enterprise, trade secret, industry, information security, information protection model

For citation: I.A. Loskutov, S.E. Akatov. Protection of commercial information flows in an industrial enterprise. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2025;52(2):122-129. (In Russ) DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-2-122-129

Введение. Большинство сведений, хранимых, обрабатываемых и исполняемых на всевозможных АРМах, серверах, оборудовании и других технических устройствах современного промышленного предприятия зачастую носят коммерческий характер, за исключением случаев, где превалирует гостайна. Принципы процессного распределения в них аналогичны [1]. В последние десятилетия наблюдается рост компьютерных атак [2]. Промышленные предприятия также попадают под них, что вынуждает правообладателей информации искать способы противодействия, искать пути поведенческого моделирования, как, например, указано в [3]. Безусловно, в Российской Федерации имеет место наличие большого количества нормативно-правовых актов по направлению [4], однако законодательная база не может явно обеспечить сохранность информации. Преступник, в лучшем случае, понесет заслуженное наказание, но прибыль, авторитет предприятия могут быть частично, а в худшем случае безвозвратно потеряны [5]. От того вопросы защиты информации (ЗИ) ложатся на плечи собственников информации, государство же пытается максимально предоставить сведения, необходимые для обеспечения ее сохранности, формируя порталные сведения – банк угроз [6] и т.п.

Постановка задачи. Для комплексного обеспечения защиты информации, необходимо не только структурировать разрозненные материалы относительно злоумышленников и их возможностей, но и также понимать, в каком направлении с большей или меньшей вероятностью будет проходить КА, в каких подразделениях АРМы, технические средства будут наиболее подвержены угрозам. Таким образом начинает формироваться потребность в разработке модели защиты промышленного предприятия; требуется рассмотреть комплексно как внутренние процессы, так и интерес со стороны к ним, обозначить важность разрабатываемой модели. Решение отмеченных задач крайне актуально на данный момент, т.к. нет единого подхода.

Методы исследования. Доказательство значимости формирования модели защиты. На промышленном предприятии, как уже было отмечено, находится много всевозможных контуров, обеспечивающих должный уровень функционирования внутренних процессов производства, потому и обеспечение ЗИ, курсирующей в них становится все более актуальной задачей с учетом возрастающих киберугроз. Однако, не стоит думать, что данный процесс тривиален, именно комплекс мер по максимизации недопущения киберинцидентов и формирует ЗИ [7]. Для создания должной модели защиты необходимо проверить гипотезу о важности данных деяний. В данном случае был проведен статистический

анализ кибернападений, показанный в [8]. Количество атак неизменно растет, однако рационально также определить процентное соотношение. На конец 2022 года в Российской Федерации было зарегистрировано порядка 2,4 млн. компаний [9], из которых на промышленное производство приходилось 238,77 тыс. (10,01% из общего числа).

Оценим вероятность возникновения киберугрозы. Для этого возьмем данные по IV кварталу 2022 года, т.к. они наиболее верно соотносятся со сведениями о количестве фирм на отечественном рынке. Уравнение примет вид:

$$P_{КА} = \frac{281000}{2382660} * 0,1001 \approx 0,0118 \Rightarrow 1,18\% \quad (1)$$

где: $P_{КА}$ – вероятность возникновения кибератаки на предприятии; 281000 – количество КА в IV квартале 2022 года; 2383660 – общее количество компаний на конец 2022 года; 0,1001 – процент промышленных предприятий (10,01%).

Однако, безусловно, расчет достаточно грубый, не исключено проведение нескольких КА на одно производство, кроме того, не стоит обходить вниманием тот факт, что полученное значение показывает только вероятность проведения атаки, а не ее успешное завершение. Отметим, что чистых цифр по количеству успешных КА в интернет пространстве мало. Наиболее подробная, на наш взгляд, информация была показана на графике в работе [10], однако ее значения разнятся с некоторыми источниками, например, с [11]. Потому далее на базе косвенных данных проведем оценку увеличения успешных КА.

На основании сведений из [11], в 2022 году прошло увеличение «успешных» КА на 56%. В качестве упрощения, примем количество КА на конец 2021 года равным значению I квартала 2022 года. Т.о., соотношение будет следующим:

$$\begin{cases} Perc_{КА_{2021}} = \frac{N_{КА_{2021}}}{180000} \\ Perc_{КА_{2022}} = \frac{N_{КА_{2022}}}{281000} \\ Perc_{КА_{2021}} * 1,56 = Perc_{КА_{2022}} \end{cases} \quad (2)$$

где: $Perc_{КА_{2021}}$, $Perc_{КА_{2022}}$ – процент КА в 2021 и 2022 году; $N_{КА_{2021}}$, $N_{КА_{2022}}$ – количество успешных КА в 2021 и 2022; 1,56 – учет увеличения на 56 % количества успешных КА. В результате, $N_{КА_{2022}}$ стал в $\approx 2,44$ раза больше, чем $N_{КА_{2021}}$.

При условии допущения, что всего лишь 1/1000 из КА достигала цели в 2022 году, ее вероятность будет: $P_{успКА} = 1,18\% * 0,001 \approx 0,002\%$ (3)

где: $P_{успКА}$ – вероятность успешности КА на промышленном предприятии; 0,001 – приблизительное соотношение успешности КА в 2022 года относительно промышленных предприятий.

Однако, при сохранении динамики, данный параметр будет меняться по логике рис. 1.

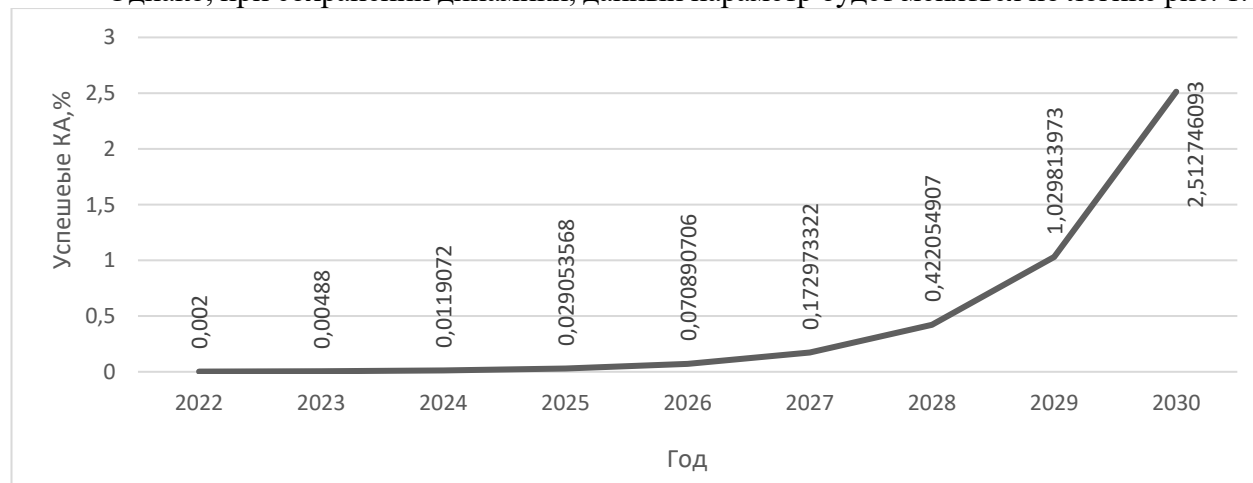


Рис. 1 – Прогнозируемое количество успешных КА

Fig. 1 - Predicted number of successful CA

С учетом, что на 2022 год потери по [12] у компаний составили 20 млн. руб., при условии стабильности на одну успешную КА, график средних потерь при совмещении с рис. 1 будет таким (рис. 2).

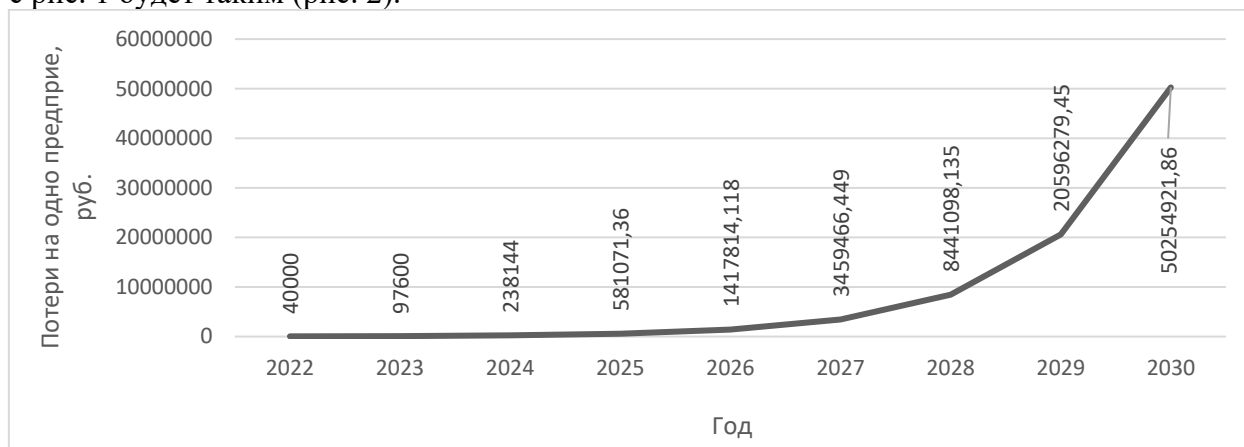


Рис. 2 – График средних потерь на одну компанию от КА

Fig. 2 - Schedule of medium losses per company from CA

На графике видно, что потери стабильны и равны известным ранее 20 млн руб., однако в реальности цифры будут много больше по понятным причинам.

Важно отметить, что несмотря на малое значение, приходящееся в целом на единичное предприятие, оно достаточно сильно влияет на ее экономику, т.к. ущерб не усреднен. Кроме того, как можно заметить, в потенциале суммы очень значительно вырастут.

Отмеченные выкладки полностью доказывают важность борьбы с киберпреступниками. Для обеспечения должного уровня ИБ необходимо понимать, что обязательно должно быть сделано на промышленном предприятии, чтобы свести вероятность возникновения киберугрозы к минимуму.

Поэтому, далее можно непосредственно перейти к формированию модели защиты.

Формирование типовой организационной структуры промышленного предприятия. Как известно, промышленное предприятие состоит из достаточно большого количества различных организационных единиц. В следствие постоянного роста киберпреступлений [13], значимая доля которых приходится на рассматриваемые организационные единицы [14], важно определить их базис-состав.

Безусловно, на данный момент времени накопилось достаточное количество информации относительно функционирования входящих в него структурных компонентов. Наиболее удобным для рассмотрения следует считать наработки, показанные в работе [15]. Причиной выбора является оптимальное углубление и дробление организационной структуры.

Так, на основании отмеченных материалов, модель типового предприятия будет из себя представлять порядка 18 базис-частей. Отдельно отметим, что в случае дивизионального характера организационной структуры, свойственной корпорациям и иным конгломератным объединениям, возможна надстройка, однако она будет или дублирующей, или же расширенной в виде генерального директора дивизиона и т.п., по аналогичной логике.

Исследование проводилось с точки зрения обеспечения ЗИ из работы [15] с присуждением трех уровневой категории значимости обеспечения ИБ. Результат сведен в табл. 1. Таким образом, была создана уровневая градация подразделения, необходимая для последующего распределения сил службы ИБ в КИИ.

Обсуждение результатов. Формирование модели защиты. Для обеспечения должного уровня ЗИ были определены минимальные требования к ИБ на промышленном предприятии. В данном случае это: ИАФ: 1, 3, 4, 5, 6. Опишем причины отсутствия 2 и 7 позиций.

Таблица 1 – Вероятность кибератаки на подразделение
Table 1 – The probability of cyber attack on the unit

Подразделение Division	Уровень Level			Подразделение Division	Уровень Level		
	Низкий Low	Средний Medium	Высокий High		Низкий Low	Средний Medium	Высокий High
Экспериментальный цех Experimental shop			+	Инструментальный цех Tool shop	+		
Ремонтно-механический цех Repair and mechanical shop	+			Электромеханический цех Electromechanical shop		+	
Основные производственные цехи Main production shops			+	Планово-диспетчерский отдел Scheduling and dispatching department			+
Отдел главного технолога Chief technologist departments			+	Отделы главного механика Chief mechanic departments			+
Отдел главного энергетика Chief power engineer departments			+	Отделы главного конструктора Chief designer departments			+
Отдел маркетинга Marketing department	+			Главный инженер Chief engineer		+	
Финансово-экономический отдел Financial and economic department		+		Заместитель директора по производству Deputy director for production	+	+	
Отдел бухгалтерии Accounting department		+		Директор Director	+		
Заместитель директора по сбыту Deputy sales director	+			Главный экономист Chief economist	+		

В случае с ИАФ 2 – необходимости в регистрации техники не имеет смысла, т.к. все процессы происходят внутри одного здания. Политика большинства предприятий запрещает проносить персональную оргтехнику, т.е. появление сторонней незарегистрированной техники в них крайне маловероятна. Кроме того, внутренние связи, обеспечивающие критические процессы в целом не должны взаимодействовать со сторонней оргтехникой, от того и данного ИАФ – нет в перечислении.

ИАФ 7. Отказ от данной меры аналогично доводами из предыдущего пункта.

- УПД: 1-6, 9, 10, 13, 15-17.

УПД 7 – информирование о наличии в ИС систем ИБ – неоправданно. Причина кроется в том, что при поступлении на работу на промышленных предприятиях практически всегда имеется документ, в котором разъясняются вопросы политики ИБ. Более того, сотрудники в обязательном порядке подписывают у руководителя документы соответствующего характера и, как правило, на начальника возлагается ответственность по доведению информации по данному вопросу до работников.

УПД 8 – на промышленных предприятиях за каждым сотрудником зарегистрирован свой АРМ, в кабинетах постоянно находятся несколько сотрудников, т.о. вероятность занятия АРМ сторонним сотрудником минимален.

УПД 11 – без идентификации пользователь не может попасть на сервер ИС. Как правило, нормы рассматриваемых копаний запрещают хранить коммерческие данные вне сервера, что соответствует политике ИБ, а, следовательно, в ограничении пользователей подобным образом нет смысла.

УПД 12 – метки безопасности неприменимы при рассмотрении только коммерческой тайны, т.к. это единственный уровень секретности.

УПД 14 неприменимо вследствие практически повсеместного использования проводных технологий связи. Это оправдано как с точки зрения обеспечения ИБ, так и с точки зрения скорости передачи данных что крайне важно в непрерывных техпроцессах, по большей части свойственных для промышленных предприятий.

– ОПС: 1-3.

Причиной не выбора ОПС 4 является тот факт, что достаточно много программ работают с оперативной памятью. Особенно это касается микроконтроллеров оборудования. В связи с необходимостью обеспечения быстроты техпроцесса, очистка может привести к простоям и сбиванию производственных циклов.

– ЗНИ: 1-4, 6-8.

ЗНИ 5 не оправдано применять на промышленном предприятии по причине повсеместного использования описанных в пункте средств для нужд. Кроме того, немаловажную роль играет отсутствие практической возможности вынести особо значимые материалы с большинства промышленных предприятий.

– РСБ: 1-8, АВЗ: 1,2, СОВ: 1, 2, АНЗ: 1-5, ЗСВ: 1-10.

Все элементы данных пунктов рационально применять на промышленном предприятии, потому разбирать исключения нет возможности.

– ОЦЛ: 1-3, 5, 6, 8.

ОЦЛ 4 нерационально применять, т.к. ИС промышленного предприятия по большей части создают с учетом отсутствия возможности выхода в сеть, соответственно и поступления писем в контура АС и средств обеспечения их должного функционирования невозможно.

ОЦЛ 7 неприменим в ИС промышленного предприятия, т.к. многие технические данные (большая часть информации) физически не могут быть оценены.

– ОДТ: 1, 3-6.

ОДТ 2 – для обеспечения коммерческой тайны использовать дублем дорогие технические средства защиты неоправданная роскошь, которую многие не смогут экономически позволить, потому данный пункт не стоит включать.

ОДТ 7 не оправдан на промышленном предприятии вследствие отсутствия необходимости в данном виде контроля.

– ЗТС: 2-5.

Коммерческая информация, обрабатываемая на промышленном предприятии крайне маловероятно будет считана через технические каналы вследствие потребности в использовании достаточно сложных и дорогих технических решений. Окупаемость таких процедур очень мала.

– ЗИС: 1, 3, 10, 20, 22, 26

ЗИС 2 – для промышленного предприятия то, что рассматривается в Методическом документе как низкоприоритетные процессы становятся куда значимее, из-за финансовой составляющей, потому и контроль над их исполнением бессмысленен.

Остальные ЗИС не были выбраны по причинам уже описанным выше; отмеченные ЗИСы дополняют их или тесно с ними связаны, как пример реализация мобильной технологии или процессов, явно замедляющих техпроцессы / засоряющих полосу пропускания, поэтому и их реализация неактуальна.

Комбинация отмеченных технологий ИБ формирует необходимую модель ЗИ коммерческих потоков на промышленном предприятии.

Вывод. Данное научное исследование может быть актуально как специалистам в области защиты информации, так и научным сотрудникам, занятым в области исследования обеспечения ИБ на промышленных предприятиях при обеспечении сохранности коммерческой тайны. Полученные в работе выкладки позволяют оценить динамику роста ущерба от КА, тем самым доказывая важность подобных исследований. Результаты исследования дают обоснование неоправданности применения некоторых мер при рассмотрении производства с точки зрения ЗИ коммерческого назначения.

Библиографический список:

1. Коновалова Г.И. Технология моделирования информационного процесса промышленного предприятия. Известия ТулГУ. Экономические и юридические науки. – 2012. – № 2(1). – С. 143-150
2. Ромашкина Н.Ю. Влияние глобальной компьютеризации на развитие экономической преступности в сфере компьютерной информации. Вопросы совершенствования правоохранительной деятельности: взаимодействие науки, нормотворчества и практики : сборник материалов III Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, Москва, 11 июня 2020 года, Москва: Московский университет МВД России имени В.Я. Кикотя. – 2020. – С. 588-591
3. Малышева, АА., Гусева ЕА., Ювченко ДА. Игровое моделирование стратегии защиты корпоративной сети предприятия от атак вредоносного программного обеспечения. Поколение будущего: взгляд молодых ученых - 2020 : сборник научных статей 9-й Международной молодежной научной конференции, Курск, 12–13 ноября 2020 года. Том 4, Курск: Юго-Западный государственный университет. – 2020. – С. 69-72
4. Лоскутов И.А. Общая характеристика информационной безопасности Российской Федерации. Молодёжный вестник Новороссийского филиала Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2023. – № 3(2). – С. 168–174.
5. ISACA's CYBERSECURITY NEXUS. [Электронный ресурс]. – URL: <http://new.groteck.ru/images/catalog/39049/5818630bf28bcd9a93f676aa7169fae.pdf> (дата обращения 05.11.2024)
6. Банк данных угроз безопасности информации. [Электронный ресурс]. – URL: <https://bdu.fstec.ru/> (дата обращения 01.10.2024).
7. Батаева И.П. Защита информации и информационная безопасность. Труды международного симпозиума «Надежность и качество». – 2012. – № 1. – С. 116-118.
8. Кибератаки на российские компании в I квартале 2023 года. [Электронный ресурс]. – URL: <https://rt-solar.ru/upload/iblock/ad3/3j9s24qws3lcnjmoilaowut9aff7jco/Otchet-Kiberataki-na-rossiyskie-kompanii-v-I-kvartale-2023-goda.pdf> (дата обращения 08.12.2024).
9. Количество действующих предприятий в России, по отраслям. [Электронный ресурс]. – URL: <https://topic.ru/statistics/ekonomics-and-politic/business/kolichestvo-deystvuyushchikh-predpriyatiy-v-rossii-po-otraslyam/> (дата обращения 08.12.2024).
10. Мартынюк МС. Организационно-управленческие механизмы обеспечения кибербезопасности российских компаний. Финансовые рынки и банки. – 2023. – №6. – С. 5-9.
11. Актуальные киберугрозы для промышленных организаций: итоги 2022 года. [Электронный ресурс]. – URL: <https://ict.moscow/research/aktualnye-kiberugrozy-dlia-promyshlennykh-organizatsii-itogi-2022-goda/> (дата обращения 15.12.2024).
12. Потери российских компаний от хакеров за год превысили десятки миллионов рублей. [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.ferra.ru/news/v-rossii/poteri-rossiiskikh-kompanii-ot-khakerov-za-god-prevysili-desyatki-millionov-rublei-06-09-2023.htm?ysclid=log9ja8fp0861142303> (дата обращения 20.12.2024).
13. Усачев СИ, Алиев ТФ. Киберпреступность: современное состояние и актуальные способы противодействия. Искусство правоповедения. The art of law. – 2023. – № 1(5). – С. 75-59.
14. Базаров РТ., Хузина ГИ. Проблемы обеспечения экономической безопасности на предприятии: киберпреступления. Вестник Университета управления "ТИСБИ". – 2022. – № 3. – С. 15-25.
15. Шаломов НС. Экономические проблемы модернизации оборудования на предприятиях. Инновационная наука. – 2022. – № 6(1). – С. 87-89.

References:

1. Konovalova G.I. Technology of modeling the information process of an industrial enterprise. News of Tula State University. *Economic and legal sciences*. 2012;2(1):143-150. (In Russ)
2. Romashkina N.Yu. The impact of global computerization on the development of economic crime in the field of computer information. Issues of improving law enforcement: the interaction of science, rule-making and practice: collection of materials from the III All-Russian scientific and practical conference of young scientists, Moscow, June 11, 2020, Moscow: Moscow University of the Ministry of Internal Affairs of Russia named after V. Ya. 2020;588-591(In Russ)

3. Malysheva, AA, Guseva EA, Yuvchenko DA. Game modeling of the strategy for protecting the corporate network of an enterprise from malware attacks. *Generation of the Future: a View of Young Scientists - 2020: Collection of Scientific Articles of the 9th International Youth Scientific Conference, Kursk, November 12-13, 2020. Vol. 4, Kursk: South-West State University. 2020; 69-72*(In Russ)
4. Loskutov I.A. General Characteristics of Information Security of the Russian Federation. *Youth Bulletin of the Novorossiysk Branch of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. 2023;3(2):168-174. (In Russ)*
5. ISACA's CYBERSECURITY NEXUS. [Electronic resource]. – URL: <http://new.groteck.ru/images/catalog/39049/5818630bf28bcbd9a93f676aa7169fae.pdf> (date of access 05.11.2024)
6. Database of information security threats. [Electronic resource]. – URL: <https://bdu.fstec.ru/> (date of access 01.10.2024). (In Russ)
7. Bataeva I.P. Information protection and information security. *Proceedings of the international symposium "Reliability and quality". 2012;1:116-118. (In Russ)*
8. Cyberattacks on Russian companies in the first quarter of 2023. [Electronic resource]. – URL: <https://rt-solar.ru/upload/iblock/ad3/3j9s24qws3lcnjmoilaowut9aff7jco/Otchet-Kiberataki-na-rossiyskie-kompanii-v-I-kvartale-2023-goda.pdf> (date of access 08.12.2024). (In Russ)
9. Number of operating enterprises in Russia, by industry. [Electronic resource]. – URL: <https://topic.ru/statistics/ekonomics-and-politic/business/kolichestvo-deystvuyushchikh-predpriyatiy-v-rossii-po-otraslyam/> (date of access 08.12.2024). (In Russ)
10. Martynyuk MS. Organizational and managerial mechanisms for ensuring cybersecurity of Russian companies. *Financial markets and banks. 2023;6:5-9. (In Russ)*
11. Current cyber threats to industrial organizations: results of 2022. [Electronic resource]. – URL: <https://ict.moscow/research/aktualnye-kiberugrozy-dlia-promyshlennykh-organizatsii-itogi-2022-goda/> (date of access 12/15/2024). (In Russ)
12. Losses of Russian companies from hackers in a year exceeded tens of millions of rubles. [Electronic resource]. – URL: <https://www.ferra.ru/news/v-rossii/poteri-rossiiskikh-kompanii-ot-khakerov-za-god-prevysili-desyatki-millionov-rublei-06-09-2023.htm?ysclid=log9ja8fp0861142303> (date of access 20.12.2024). (In Russ)
13. Usachev S.I., Aliev T.F. Cybercrime: current state and current methods of counteraction. *The art of law. 2023;1(5):75-59. (In Russ)*
14. Bazarov RT., Khuzina GI. Problems of ensuring economic security at the enterprise: cybercrime. *Bulletin of the University of Management "TISBI". 2022;3:15-25. (In Russ)*
15. Shalomov N.S. Economic problems of equipment modernization at enterprises. *Innovative science. 2022;6(1): 87-89. (In Russ)*

Сведения об авторах:

Иван Андреевич Лоскутов, инженер – конструктор, отдел 55; преподаватель; младший научный сотрудник; faxvex@ya.ru

Сергей Евгеньевич Акатов, ведущий инженер; akатов.serg@gmail.com

Information about the authors:

Ivan A. Loskutov, Engineer-constructor, Department 55, faxvex@ya.ru

Sergey E. Akatov, Lead Engineer; akатов.serg@gmail.com

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/ Received 20.12.2024.

Одобрена после рецензирования / Reviced 20.01.2025.

Принята в печать /Accepted for publication 20.05.2025.

Практические рекомендации по проведению оценки защищенности программного обеспечения и выбору его оптимальной версии для эксплуатации на объектах информатизации органов внутренних дел

А.Д. Попова, И.Г. Дровникова

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

Резюме. Цель. Целью исследования является разработка практических рекомендаций по проведению количественной оценки защищенности программного обеспечения в режиме реального времени и выбору его наиболее защищенной (оптимальной) версии для эксплуатации на объектах информатизации органов внутренних дел в соответствии с требованиями действующей методической документации ФСТЭК России и с учетом особенностей и недостатков эксплуатации автоматизированных систем органов внутренних дел. **Метод.** Реализован системный подход к рассмотрению сущности проблемы оценивания защищенности программного обеспечения и проведению количественной оценки показателей защищенности. Используются методы теоретического анализа, синтеза, дедукции. **Результат.** Представлены практические рекомендации по реализации методики анализа и количественной оценки защищенности программного обеспечения с учетом уязвимостей в динамике его функционирования и выбора наиболее защищенной версии для эксплуатации в автоматизированных системах органов внутренних дел. Дополнение существующих методик проведения оценки защищенности представленными практическими рекомендациями позволяет повысить эффективность и качество оценивания программного обеспечения в процессе его жизненного цикла на объектах информатизации органов внутренних дел. **Вывод.** Перспективы использования полученных результатов связаны с разработкой методической документации для проведения оценки состояния технической защиты информации в автоматизированных системах органов внутренних дел с целью обоснования выбора организационных и технических мер обеспечения безопасности служебной информации ограниченного распространения.

Ключевые слова: автоматизированная система органов внутренних дел, программное обеспечение, уязвимости, количественные показатели защищенности, автоматизированная оценка уровня защищенности, режим реального времени

Для цитирования: А.Д. Попова, И.Г. Дровникова. Практические рекомендации по проведению оценки защищенности программного обеспечения и выбору его оптимальной версии для эксплуатации на объектах информатизации органов внутренних дел. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025;52(2):130-138. DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-2-130-138

Practical recommendations for assessing software security and choosing its optimal version for use at facilities of informatization of internal affairs agencies

A.D. Popova, I.G. Drovnikova

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

Abstract. Objective. The aim of the study is to develop practical recommendations for conducting a quantitative assessment of software security in real time and choosing its optimal version in accordance with the requirements of the FSTEC of Russia and taking into account the features and shortcomings of the operation of automated systems of internal affairs agencies.

Method. A systems approach has been implemented. The methods of theoretical analysis, synthesis, and deduction have been used. **Result.** Practical recommendations are presented for the implementation of the methodology for analyzing and quantitatively assessing the security of software, taking into account vulnerabilities and selecting the most secure version for use in automated systems of internal affairs agencies. Supplementing existing methods with practical recommendations will improve the efficiency and quality of software evaluation at IT facilities of internal affairs agencies. **Conclusion.** Prospects for using the obtained results are associated with the development of methodological documentation for assessing the state of technical information protection in automated systems of the internal affairs agencies in order to justify the choice of organizational and technical measures to ensure the security of restricted service information.

Keywords: automated system of internal affairs bodies, software, vulnerabilities, quantitative indicators of security, automated assessment of the level of security, real-time mode

For citation: A.D. Popova, I.G. Drovnikova. Practical recommendations for assessing software security and choosing its optimal version for use at facilities of informatization of internal affairs agencies. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2025; 52(2):130-138. (In Russ) DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-2-130-138

Введение. Процесс эксплуатации современных автоматизированных систем (АС) органов внутренних дел (ОВД) характеризуется рядом особенностей и недостатков, подробно рассмотренных в [1-4]. Их анализ показал, что требование обеспечения необходимой степени защищенности служебной информации ограниченного распространения, циркулирующей на объектах информатизации ОВД, может быть в значительной степени реализовано путем применения программных средств, способных безопасно функционировать в условиях растущего числа уязвимостей [5]. Следовательно, используемый программный код должен быть максимально оптимизирован с точки зрения защищенности ПО в процессе его жизненного цикла в АС ОВД.

Отсутствие соответствующих показателей, позволяющих адекватно оценивать изменение реальной защищенности ПО в процессе эксплуатации на объектах информатизации ОВД на основе анализа его уязвимостей (то есть эксплуатационную информационную безопасность (ИБ) ПО) привело к необходимости их разработки. Такого рода показатели, учитывающие возможность изменения во времени вероятностей успешной эксплуатации текущих уязвимостей высокого и критического уровней критичности в ПО и позволяющие количественно оценивать данные изменения в процессе жизненного цикла ПО в АС ОВД, предложены в [4]. Для расчета данных показателей с учетом временного фактора разработаны аналитические модели (статическая, динамические дискретные и динамическая непрерывная) и алгоритмы, которые подробно рассмотрены в [6]. В [7] описан алгоритм функционирования программного комплекса, реализующего предложенные модели и алгоритмы. Представленный программный комплекс, автоматизирующий процессы анализа и оценки защищенности ПО в режиме реального времени с учетом его уязвимостей, позволяет на основе сравнения версий используемого ПО выбрать оптимальную с точки зрения защищенности версию для эксплуатации на объектах информатизации ОВД.

Постановка задачи. Результаты анализа существующих способов оценки уровня защищенности ПО в АС [8–18], изложенные в [19], показали их практическую непригодность для проведения количественной оценки защищенности ПО в процессе его жизненного цикла в АС ОВД. Это приводит к необходимости разработки предложений, содержащих практические рекомендации по проведению количественной оценки защищенности ПО и выбору оптимальной (наиболее защищенной) его версии для эксплуатации на объектах информатизации ОВД в соответствии с требованиями действующей методической документации Федеральной службы по техническому и экспортному контролю (ФСТЭК) России [20–23] с учетом особенностей и недостатков эксплуатации АС ОВД, что и является целью данной статьи.

Методы исследования. Для реализации поставленной цели использованы методы теоретического анализа документации, синтеза, дедукции. В качестве методологической основы исследования применен системный подход как к рассмотрению сущности проблемы оценивания изменения уровня защищенности ПО в отношении текущих уязвимостей в процессе его жизненного цикла в АС ОВД, так и к проведению количественной оценки показателей защищенности ПО.

Обсуждение результатов. Показатель, характеризующий текущее состояние обеспечения безопасности значимых объектов критической информационной инфраструктуры (КИИ) РФ и (или) технической защиты информации (ЗИ), не отнесенной к государственной тайне, а также нормированное значение и порядок расчета данного показателя регламентированы методическим документом «Методика оценки показателя состояния технической защиты информации и обеспечения безопасности значимых объектов критической информационной инфраструктуры Российской Федерации», утвержденным ФСТЭК России 2 мая 2024 г. [20]. Данная методика применяется для оценки текущего состояния ЗИ в государственных органах, органах местного самоуправления, организациях, в том числе субъектах КИИ, и степени его соответствия минимально необходимому уровню ЗИ от типовых актуальных угроз безопасности информации. Оценка показателя защищенности информации $K_{зи}$ проводится не реже одного раза в шесть месяцев и полученное его значение является критерием принятия в органе (организации) управленческих решений в части необходимости реализации первоочередных мер по ЗИ от актуальных угроз безопасности информации и их приоритетности.

Порядок и содержание работ по тестированию ПО, в том числе с открытым исходным кодом, предназначенного для устранения уязвимостей в программных, программно-аппаратных средствах (обновления безопасности), которые применяются в информационных системах, информационно-телекоммуникационных сетях, АС управления, в том числе функционирующих на базе информационно-телекоммуникационной инфраструктуры центров обработки данных, регламентируются методическим документом «Методика тестирования обновлений безопасности программных, программно-аппаратных средств», утвержденным ФСТЭК России 28 октября 2022 г. [21]. Данная Методика применяется при принятии операторами информационных систем мер, направленных на устранение указанных уязвимостей в соответствии с требованиями по обеспечению безопасности значимых объектов КИИ Российской Федерации, а также требованиями по ЗИ государственных информационных систем, иными нормативными правовыми актами и методическими документами ФСТЭК России. Поскольку АС ОВД являются государственными информационными системами и, безусловно, относятся к значимым объектам КИИ РФ, то разрабатываемые практические рекомендации по проведению оценки защищенности ПО в АС ОВД, учитывающие особенности и недостатки эксплуатации данных систем, и выбору наиболее защищенной версии для использования на объектах информатизации, не должны противоречить положениям указанных методических документов.

В соответствии с [20] проведение оценки показателя защищенности ПО в АС ОВД ($K_{з\text{по}}$) должно включать:

- сбор и анализ необходимых для оценивания исходных данных (акты, протоколы, отчеты и другие документы, составленные по результатам государственного контроля, внутреннего контроля и внешней оценки соответствия в области ЗИ; внутренние организационно-распорядительные документы по ЗИ; эксплуатационную документацию на средства ЗИ; результаты проведения инвентаризации объектов информатизации ОВД; результаты опроса сотрудников по обеспечению ИБ АС ОВД; результаты анализа применения отдельных программных, программно-аппаратных средств АС ОВД; результаты работы инструментальных средств анализа и оценки защищенности ПО на объектах информатизации ОВД и (или) мониторинга его ИБ);
- проведение оценки частных показателей безопасности ПО K_{nm} , характеризующих

реализацию отдельных мер по обеспечению защищенности ПО от актуальных угроз безопасности информации на объекте информатизации ОВД (n – номер группы частных показателей безопасности, m – номер показателя в группе частных показателей безопасности);

– расчет значения показателя $K_{3\text{ ПО}}$ по формуле (1)

$$K_{3\text{ ПО}} = (K_{11} + K_{12} + K_{13})R_1 + (K_{21} + K_{22} + \dots + K_{2m})R_2 + (K_{31} + K_{32} + \dots + K_{3m})R_3 + (K_{41} + K_{42} + \dots + K_{4m})R_4,$$

где R_n – весовой коэффициент частных показателей безопасности ПО, отнесенных к n -ой группе, $n = 1..4$, и его сравнение с нормированным значением ($K_{3\text{ ПО}} = 1$).

В [20] представлены критерии оценки показателя защищенности ПО, произведенной по 4-м основным группам частных показателей безопасности: организация и управление, защита пользователей, защита информационных систем, мониторинг ИБ и реагирование (табл. 1).

Таблица 1. Оценка состояния обеспечения ИБ ПО в АС ОВД
Table 1. Assessment of the state of information security software in the ATS AS

Значение $K_{3\text{ ПО}}$ Meaning	Характеристика текущего состояния защищенности ПО Characteristics of the current state of software security
$K_{3\text{ ПО}} \leq 0,75$	Уровень состояния защищенности ПО – критический «красный»: минимальный уровень защиты от типовых актуальных угроз безопасности информации не обеспечен, существует реальная возможность реализации угроз/ Software security status level is critical "red"
$0,75 < K_{3\text{ ПО}} < 1$	Уровень состояния защищенности ПО – низкий «оранжевый»: минимальный уровень защиты от типовых актуальных угроз безопасности информации не обеспечен, существуют предпосылки реализации угроз/ Software security status level is low "orange"
$K_{3\text{ ПО}} = 1$	Уровень состояния защищенности ПО – минимальный базовый «зеленый»: минимальный уровень защиты от типовых актуальных угроз безопасности информации обеспечен Software security status level – minimum basic "green"

Необходимо отметить, что при рассмотрении группы частных показателей безопасности «Защита информационных систем» в [20] не учитывается значительное количество уязвимостей в ПО АС ОВД критического уровня опасности. При этом в случае соблюдения всех указанных в Методике требований уровень состояния защищенности ПО в АС ОВД будет низким («оранжевым»), что в соответствии с [20] требует разработки плана реализации мероприятий по достижению следующего уровня состояния защищенности ПО от актуальных угроз. Кроме того, данная оценка допускает отсутствие проверки вложений на наличие вредоносного ПО и централизованного управления средствами антивирусной защиты (на ~ 20 % пользовательских устройств).

В результате значительное количество устройств, обладающих огромным числом неустраненных уязвимостей в ПО, в том числе и критических, окажутся неучтенными, что может послужить причиной существенного сбоя в работе АС ОВД. Следовательно, необходимо проведение регулярного тестирования обновлений безопасности с учетом уязвимостей критического уровня критичности в используемом ПО.

Согласно [21] тестированию подлежат обновления безопасности, направленные на устранение уязвимостей, уровень критичности которых должен определяться в соответствии с требованиями методического документа «Методика оценки уровня критичности уязвимостей программных и программно-аппаратных средств», утвержденного ФСТЭК России 28 октября 2022 г. [22].

Тестирование обновлений безопасности проводится с целью своевременного выявления в них потенциально опасных функциональных возможностей, незадекларированных разработчиком программных, программно-аппаратных средств, и включает следующие этапы:

1) Этап подготовки к проведению тестирования – получение обновлений безопасности и подготовка среды тестирования (исследовательского стенда, тестовой зоны АС, функционирующей в штатном режиме АС ОВД).

2) Этап проведения тестирования – выполнение тестов Т001 – Т006 (табл. 2).

Таблица 2. Характеристика этапа проведения тестирования обновлений безопасности
Table 2. Characteristics of the stage of testing security updates

Название теста Test name	Содержание и условия выполнения теста Contents and conditions of execution and testing
T001 – сверка идентичности identity verification	Заключается в получении обновлений безопасности из различных источников и (или) различными способами, расчете и сравнении их контрольных сумм. Проводится, если имеется возможность получать обновления безопасности из различных источников и (или) различными способами/ receiving security updates
T002 – проверка подлинности authenticity Check	Заключается в распаковке файлов обновлений безопасности и определении критериев проверки их подлинности. Проводится, если имеются предоставляемые разработчиком обновления штатных средств проверки подлинности файлов обновлений безопасности, а также если до установки файлов в среде функционирования исследователь может получать их в распакованном (расшифрованном) виде/ unpacking update files
T003 – антивирусный контроль Antivirus Control	Заключается в выявлении вредоносных компьютерных программ (вирусов) в исследуемых обновлениях безопасности с использованием средств антивирусной защиты. Проводится, если имеются не менее двух средств антивирусной защиты разных разработчиков/ detection of malicious computer programs
T004 – поиск опасных конструкций Search for Dangerous Constructions	Заключается в поиске опасных конструкций в обновлениях безопасности с применением YARA-правил, индикаторов компрометации и др., контекстном поиске политических баннеров, лозунгов и другой противоправной информации в обновлениях безопасности. Проводится, если до или после установки файлов обновлений в среде функционирования у исследователя имеется возможность получать их в распакованном виде/ search for dangerous structures
T005 – мониторинг активности Activity Monitoring	Заключается в получении и анализе сведений о поведении обновляемых программных, программно-аппаратных средств в результате их взаимодействия со средой функционирования или другими программами, а также анализе сведений о взаимодействии компонентов обновляемых программных, программно-аппаратных средств. Проводится, если имеется возможность установки необходимых инструментов в среде тестирования обновляемого программного, программно-аппаратного средства/ analysis of information about updated programs
T006 – ручной анализ Manual Analysis	Заключается в анализе логики работы, исследовании компонентов обновлений безопасности с помощью трассировщиков и отладчиков, проверке присутствия ключевой информации в обновлениях безопасности, использовании статического и динамического анализа. Проводится, если по результатам выполнения тестов: выявлены различия в обновлениях безопасности, полученных разными способами и (или) из разных источников; обнаружены признаки вредоносной активности в файлах обновлений безопасности в результате антивирусного контроля или мониторинга их активности в среде функционирования; неуспешно пройден тест подлинности файлов обновлений безопасности; выявлены опасные конструкции/ analysis of the logic of the update components

– Этап оформления результатов тестирования – подготовка отчета тестирования обновлений безопасности, включающего: наименования обновлений безопасности; сведения о местах размещения обновлений безопасности, контрольных суммах, дате их выпуска, разработчике, версиях ПО; сведения об уязвимостях, на устранение которых направлены обновления безопасности; наименования проведенных тестов; результаты тестирования (успешно/не успешно); описание результатов тестирования, включая средства проведения тестирования, среду тестирования, выявленные признаки недекларированных возможностей, описания проведенных тестов.

Отчеты тестирования обновлений безопасности направляются на адрес электронной почты webmaster@bdu.fstec.ru, где после проведения верификации полученные результаты тестирования размещаются оператором в Банке данных угроз безопасности информации ФСТЭК России в течение одного рабочего дня. В соответствии с [21] решение об установке протестированных обновлений безопасности должен принимать оператор АС ОВД с учетом результатов тестирования и оценки нарушения функционирования системы от установки таких обновлений. Учитывая результаты проведенных исследований [4, 6, 7, 24]

предлагается расширить содержание основных этапов реализации рассмотренной Методики [21] применительно к объектам информатизации ОВД и разработать практические рекомендации по проведению оценки защищенности ПО в процессе его жизненного цикла и выбору наиболее защищенной (оптимальной) версии для эксплуатации в АС ОВД, изложенные в табл. 3.

Таблица 3. Практические рекомендации по реализации методики анализа, оценки защищенности и выбора оптимальной версии ПО для эксплуатации в АС ОВД

Table 3. Practical recommendations for the implementation of the methodology for analysis, security assessment and selection of the optimal version of software for operation in the ATS AS

№ этапа Stage number	Название этапа Stage name	Содержание этапа Stage content
1	Подготовка к проведению тестирования Preparing for testing	Получение версий используемого ПО. Подготовка среды тестирования – функционирующей в штатном режиме АС ОВД
2	Проведение тестирования Conducting testing	Формирование исходных данных для проведения тестирования каждой версии ПО [24]: Определение исходных данных для расчета статического показателя защищенности ПО $V_{кр0}$ – уровня критичности уязвимостей в версии ПО. Определение исходных данных для расчета динамического показателя защищенности ПО $V_{г0}$ – коэффициента готовности версии ПО к безопасной эксплуатации в отношении уязвимостей. Определение исходных данных для расчета динамического показателя защищенности ПО $V_{ин0}$ – интервального показателя нарушения защищенности версии ПО. Определение исходных данных для расчета динамического показателя защищенности ПО $V_{вз0}(t)$ – показателя временной защищенности версии ПО) Автоматизированное оценивание показателей защищенности каждой версии ПО (с использованием разработанного программного комплекса) [4, 6]: Расчет уровня критичности уязвимостей в версии ПО ($V_{кр0}$) на основе аналитической статической модели. Расчет коэффициента готовности версии ПО к безопасной эксплуатации ($V_{г0}$) в отношении уязвимостей на основе аналитической динамической дискретной модели. Расчет интервального показателя нарушения защищенности версии ПО ($V_{ин0}$) на основе аналитической динамической дискретной модели. Расчет показателя временной защищенности версии ПО ($V_{вз0}(t)$) на основе аналитической динамической непрерывной модели. Расчет комплексного показателя защищенности версии ПО ($V_{з0\text{ ПО}}$). Автоматизированное сравнение версий ПО и выбор наиболее защищенной его версии (с использованием разработанного программного комплекса) [7]
3	Оформление результатов тестирования Registration of test results	Составление отчета тестирования: Наименования версий используемого ПО. Сведения об уязвимостях в версиях ПО. Описание результатов тестирования (сведения о значениях комплексных показателей защищенности версий ПО). Наименование оптимальной (наиболее защищенной) версии ПО

Вывод. Результаты верификации предложенной методики анализа, оценки защищенности и выбора наиболее защищенной (оптимальной) версии ПО с использованием разработанного программного комплекса подтвердили ее эффективность. Полученные результаты дают основание констатировать, что дополнение утвержденных ФСТЭК России Методик [20, 21] представленными практическими рекомендациями по проведению количественной оценки защищенности ПО в режиме реального времени и выбору наиболее защищенной (оптимальной) его версии для эксплуатации в АС ОВД позволит повысить эффективность и качество оценивания с учетом уязвимостей в процессе жизненного цикла ПО на объектах информатизации ОВД.

Представленные в статье предложения, содержащие практические рекомендации по применению разработанных моделей, алгоритмов и программного комплекса при проведении количественной оценки защищенности ПО, учитывая особенности и недостатки эксплуатации АС ОВД, могут быть использованы при разработке методической документации для оценивания состояния технической защиты информации на объектах информатизации ОВД. Перспективы проведения такой оценки связаны с обоснованием выбора организационных и технических мер обеспечения безопасности служебной информации ограниченного распространения, циркулирующей в АС ОВД.

Библиографический список:

1. Золотых Е.С. Модели оценки опасности реализации сетевых атак в автоматизированных системах органов внутренних дел: дис. канд. техн. наук: 2.3.6. Золотых Елена Сергеевна. Воронеж, 2022. 220 с.
2. Бацких А.В. Модели оценки эффективности функционирования модифицированных подсистем управления доступом к информации в автоматизированных системах органов внутренних дел: 2.3.6. дисс. канд. техн. наук/Бацких Анна Вадимовна. Воронеж, 2022. – 190 с.
3. Попов А.Д. Модели и алгоритмы оценки эффективности систем защиты информации от несанкционированного доступа с учетом их временных характеристик в автоматизированных системах органов внутренних дел: 05.13.19 дис. канд. техн. наук/ Попов Антон Дмитриевич. Воронеж, 2018. 163 с.
4. Дровникова И.Г. Показатели защищенности программного обеспечения, используемого на объектах информатизации органов внутренних дел/И.Г. Дровникова, А.Д. Попова// Вестник Воронежского института МВД России. – 2024. – № 1. – С. 50–59.
5. Щеглов А.Ю. Элементы теории эксплуатационной информационной безопасности: учебное пособие / А. Ю. Щеглов. – Санкт-Петербург: СПбГУ ИТМО, 2014. – 59 с.
6. Попова А.Д. Методика анализа и оценки уровня защищенности программного обеспечения, используемого на объектах информатизации органов внутренних дел/ А.Д. Попова, И. Г. Дровникова // Безопасность информационных технологий = IT Security. – Том 31. – № 2 (2024). – С. 51–64.
7. Попова А.Д. Алгоритм функционирования программного комплекса анализа и оценки защищенности программного обеспечения автоматизированных систем органов внутренних дел//Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2024. Т.51(2). С.128–136.
8. ГОСТ Р ИСО/МЭК 25051-2017 Информационные технологии. Системная и программная инженерия. Требования и оценка качества систем и программного обеспечения. М.:Стандартинформ, 2017. 32 с.
9. Безопасность информационных технологий. Критерии оценки безопасности информационных технологий:Руководящий документ от 19 июня 2002 г. № 187 // ФСТЭК России [Эл. ресурс]. – Режим доступа: <https://fstec.ru/dokumenty/vse-dokumenty/spetsialnye-normativnye-dokumenty/rukovodyashchij-dokument-ot-19-iyunya-2002-g-n-187> (дата обращения: 30.10.2024).
10. ГОСТ Р ИСО/МЭК 9126-93. Информационная технология. Оценка программной продукции. Характеристики качества и руководства по их применению [Эл.ресурс]. – Режим доступа : <http://docs.cntd.ru/document/gost-r-iso-mek-9126-93> (дата обращения 05.11.2024).
11. ISO/IEC 17000:2004. Conformity assessment. Dictionary and General principles [Эл. ресурс]. – Режим доступа : <https://pqm-online.com/assets/files/lib/std/iso17000-2004.pdf> (дата обращения: 06.11.2024).
12. ISO/IEC 27002:2005-2013 Information technology. Security method. Practical rules of information security management [Эл. pec.]. <http://docs.cntd.ru/document/gost-r-iso-mek-17799-2005>(дата об.06.11.2024).
13. Ефимов А.О., И.И. Лившиц, Т.В. Мещерякова, Е. А. Рогозин. Концептуальные основы оценки уровня защищенности автоматизированных систем на основе их уязвимости// Безопасность информационных технологий = IT Security. – Том 30. – № 2(2023). – С. 63–79.
14. К вопросу оценки защищенности автоматизированных систем по критичности их уязвимостей / А.О. Ефимов [и др.] // Вестник воронежского института ФСИН России. – 2023. – № 2. – С. 50–54.
15. Радько Н.М., Ю.К. Язов, Н.Н. Корнеева. Проникновения в операционную среду компьютера: модели злоумышленного удаленного доступа: учеб. пособ. Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2013. – 265 с.
16. Язов Ю.К., С.В. Соловьев. Методология оценки эффективности защиты информации в информационных системах от несанкционированного доступа: монография. Санкт-Петербург: Научное издание, 2023. – 258 с.
17. Язов Ю.К., А.В. Анищенко. Сети Петри-Маркова и их применение для моделирования процессов реализации угроз безопасности информации в информационных системах: монография. – Воронеж : Кварта, 2020. – 173 с.
18. Common Vulnerability Scoring System version 4.0: User Guide–e [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.first.org/cvss/v4.0/user-guide> (дата обращения: 15.11.2024).
19. Дровникова И.Г., Попова А.Д. Способы оценки уровня защищенности программного обеспечения автоматизированных систем органов внутренних дел и направления их совершенствования//Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023; 50(4): 85-92.

20. Методика оценки показателя состояния технической защиты информации и обеспечения безопасности значимых объектов критической информационной инфраструктуры Российской Федерации : методический документ от 2 мая 2024 г. // ФСТЭК России [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://fstec.ru/dokumenty/vse-dokumenty/spetsialnye-normativnye-dokumenty/metodicheskij-dokument-ot-2-maya-2024-g> (дата обращения: 25.11.2024).
21. Методика тестирования обновлений безопасности программных, программно-аппаратных средств : методический документ от 28 октября 2022 г. // ФСТЭК России [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://fstec.ru/dokumenty/vse-dokumenty/spetsialnye-normativnye-dokumenty/metodicheskij-dokument-ot-28-oktyabrya-2022-g-2> (дата обращения: 25.11.2024).
22. Методика оценки уровня критичности уязвимостей программных, программно-аппаратных средств : методический документ от 28 октября 2022 г. // ФСТЭК России [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://fstec.ru/dokumenty/vse-dokumenty/spetsialnye-normativnye-dokumenty/metodicheskij-dokument-ot-28-oktyabrya-2022-g-2> (дата обращения: 20.11.2024).
23. Руководство по организации процесса управления уязвимостями в органе (организации) : методический документ от 17 мая 2023г. ФСТЭК России [Эл.ресурс]. <https://fstec.ru/dokumenty/vse-dokumenty/spetsialnye-normativnye-dokumenty/metodicheskij-dokument-ot-17-maya-2023-g> (дата обращения: 25.11.2024).
24. Попова А.Д. Методика эксперимента для оценивания защищенности программного обеспечения автоматизированных систем органов внутренних дел/А.Д. Попова, А.Д. Попов, И.Г. Дровникова // Безопасность информационных технологий = IT Security. – Том 32. – № 1(2025). – С. 95–111.

References:

1. Zolotykh E.S. Models for assessing the danger of implementing network attacks in automated systems of internal affairs bodies: dis. Cand. of Techn. Scie. 2.3.6. Zolotykh Elena Sergeevna. Voronezh, 2022: 220 (In Russ).
2. Batskikh A. V. Models for assessing the effectiveness of modified information access control subsystems in automated systems of internal affairs bodies: dis. 2.3.6. Cand. of Techn. Scie. Batskikh Anna Vadimovna. - Voronezh, 2022: 190 p. (In Russ).
3. Popov A. D. Models and algorithms for assessing the effectiveness of information protection systems from unauthorized access, taking into account their time characteristics in automated systems of internal affairs bodies: 05.13.19 dis. Cand. of Technical Scie. Popov Anton Dmitrievich. Voronezh, 2018: 163 p. (In Russ).
4. Drovnikova I. G. Security indicators of software used at the information technology facilities of the internal affairs bodies / I. G. Drovnikova, A. D. Popova. *Bulletin of the Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia*. 2024; 1: 50–59. (In Russ).
5. Shcheglov A. Yu. Elements of the theory of operational information security: a tutorial / A. Yu. Shcheglov. – St. Petersburg: SPbSU ITMO, 2014: 59 p. (In Russ).
6. Popova A. D. Methodology for analyzing and assessing the security level of software used at the information technology facilities of the internal affairs bodies / A. D. Popova, I. G. Drovnikova. *Information technology security = IT Security*. 2024; 31(2): 51–64. (In Russ).
7. Popova A. D. Algorithm for the functioning of the software package for analyzing and assessing the security of software of automated systems of internal affairs bodies. *Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Sciences*. 2024; 51(2): 128–136. (In Russ).
8. GOST R ISO/IEC 25051-2017. Information technology. Systems and software engineering. Requirements and quality assessment of systems and software. – Moscow: Standartinform, 2017: 32 p. (In Russ).
9. Information technology security. Criteria for assessing the security of information technology: Guidance document of June 19, 2002, No. 187 // FSTEC of Russia [Electronic resource]. - Access mode: <https://fstec.ru/dokumenty/vse-dokumenty/spetsialnye-normativnye-dokumenty/rukovodyashchij-dokument-ot-19-iyunya-2002-g-n-187> (accessed: 10/30/2024). (In Russ).
10. GOST R ISO / IEC 9126-93. Information technology. Software product evaluation. Quality characteristics and guidelines for their application [Electronic resource]. - Access mode: <http://docs.cntd.ru/document/gost-r-iso-mek-9126-93> (accessed 11/05/2024). (In Russ).
11. ISO/IEC 17000:2004. Conformity assessment. Dictionary and General principles [Electronic resource]. – Access mode: <https://pqm-online.com/assets/files/lib/std/iso17000-2004.pdf> (accessed: 06.11.2024).
12. ISO/IEC 27002:2005-2013. Information technology. Security method. Practical rules of information security management [El. resource]. : [http://docs.cntd.ru/document/gost-r-iso-mek-17799-2005\(06.11.2024\)](http://docs.cntd.ru/document/gost-r-iso-mek-17799-2005(06.11.2024)).
13. Efimov A. O. Conceptual foundations for assessing the level of security of automated systems based on their vulnerability / A. O. Efimov, I. I. Livshits, T. V. Meshcheryakova, E. A. Rogozin. *Information Technology Security = IT Security*. 2023; 30(2): 63-79. (In Russ).
14. On the issue of assessing the security of automated systems based on the criticality of their vulnerabilities. A. O. Efimov [et al.]. *Bulletin of the Voronezh Institute of the Federal Penitentiary Service of Russia*. 2023; 2: 50-54. (In Russ).
15. Radko N. M. Penetrations into the computer operating environment: models of malicious remote access: tutorial / N. M. Radko, Yu. K. Yazov, N. N. Korneeva. Voronezh: Voronezh State Technical University, 2013; p.

16. Yazov Yu. K., S.V. Soloviev. Methodology for assessing the effectiveness of information protection in information systems from unauthorized access: monograph. St. Petersburg: Science-intensive technologies, 2023;258 p. (In Russ).
17. Yazov Yu.K., A.V. Anishchenko. Petri-Markov networks and their application for modeling the processes of implementing information security threats in information systems: oronezh:Kvarta, 2020;173(In Russ).
18. Common Vulnerability Scoring System version 4.0: User Guide [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.first.org/cvss/v4.0/user-guide> (date of access: 15.11.2024). (In Russ).
19. Drovnikova I.G. Methods for assessing the level of security of software of automated systems of internal affairs bodies and directions for their improvement / I.G. Drovnikova, A.D. Popova. *Herald of the Dagestan State Technical University. Technical sciences.* 2023; 50(4): 85-92. (In Russ).
20. Methodology for assessing the indicator of the state of technical protection of information and ensuring the security of significant objects of the critical information infrastructure of the Russian Federation: methodological document of May 2, 2024//FSTEC of Russia [Electronic resource]. - Access mode: <https://fstec.ru/dokumenty/vse-dokumenty/spetsialnye-normativnye-dokumenty/metodicheskij-dokument-ot-2-maya-2024-g> (date of access: 11/25/2024). (In Russ).
21. Methodology for testing security updates for software, firmware and hardware: methodological document of October 28, 2022/FSTEC of Russia [Electronic resource]. – Access mode: <https://fstec.ru/dokumenty/vse-dokumenty/spetsialnye-normativnye-dokumenty/metodicheskij-dokument-ot-28-oktyabrya-2022-g-2> (date of access: 25.11.2024). (In Russ).
22. Methodology for assessing the criticality level of software, software and hardware vulnerabilities: methodological document dated October 28, 2022 // FSTEC of Russia [Electronic resource]. – Access mode: <https://fstec.ru/dokumenty/vse-dokumenty/spetsialnye-normativnye-dokumenty/metodicheskij-dokument-ot-28-oktyabrya-2022-g-2> (date of access: 20.11.2024). (In Russ).
23. Guidelines for organizing the vulnerability management process in a body (organization): methodological document dated May 17,2023. FSTEC of Russia [Electronic resource]. Access mode: <https://fstec.ru/dokumenty/vse-dokumenty/spetsialnye-normativnye-dokumenty/metodicheskij-dokument-ot-17-maya-2023-g> (accessed: 11/25/2024). (In Russ).
24. Popova A.D., A.D. Popov, I.G. Drovnikova. Experimental methodology for assessing the security of software of automated systems of internal affairs bodies. *Information Technology Security = IT Security.* 2025; 32(1):95-111. (In Russ).

Сведения об авторах:

Арина Дмитриевна Попова, адъюнкт; arnpva@mail.ru

Ирина Григорьевна Дровникова, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры автоматизированных информационных систем органов внутренних дел; drovnikova@mail.ru

Information about authors:

Arina D. Popova, adjunct; arnpva@mail.ru

Irina G. Drovnikova, Dr. Sci.(Eng.), Prof., Prof., Department of Automated Information Systems of Internal Affairs Bodies; drovnikova@mail.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/ Received 17.04. 2025.

Одобрена после рецензирования/ Revised 22.05.2025.

Принята в печать/ Accepted for publication 02.06.2025.

Механизм защиты от DDoS–атаки, направленной на блокирование учётных записей

П.В. Разумов, Л.В. Черкесова, Е.А. Ревякина, А.А. Клевцов

Донской государственный технический университет,
344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является программный анализ кибератаки, осуществляемой с целью блокировки учётных записей и реализация защиты механизма защиты. **Метод.** Исследование основано на применении языка программирования PHP в среде IDE PhpStorm от компании JetBrains. Помимо данного языка использовались языки верстки CSS и JS, язык разметки HTML. **Результат.** Подробным образом рассматривается DDoS-атака типа блокирования учётных записей, ее возможные последствия и существующие механизмы защиты. С целью противодействия осуществлению данной атаки предложена модификация алгоритма, которая позволяет значительно снизить вероятность её успешного проведения. Результатом данной работы является разработанное программное средство и проведенный сравнительный анализ с аналогичными продуктами на рынке. **Вывод.** Проанализированы готовые программные решения и разработан механизм защиты, являющийся современным решением, обеспечивающим и надежную защиту учётных записей пользователей, и защиту от атак, направленных на них.

Ключевые слова: DDOS атака, блокировка, учётные записи, механизм реализации атаки, противодействие атаке, алгоритм нейтрализации атаки

Для цитирования: П.В. Разумов, Л.В. Черкесова, Е.А. Ревякина, А.А. Клевцов. Механизм защиты от DDoS–атаки, направленной на блокирование учётных записей. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025; 52(2):139-149. DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-2-139-149

Protection mechanism against ddos attack intended to block account

P.V. Razumov, L.V. Cherkesova, E.A. Revyakina, A.A. Klevtsov

Don State Technical University,
1 Gagarin Square, Rostov-on-Don 344000, Russia

Abstract. Objective. The aim of the study is a software analysis of a cyber attack carried out to block accounts and implement protection of the protection mechanism. **Method.** The study is based on the use of the PHP programming language in the PhpStorm IDE environment from JetBrains. In addition to this language, the CSS and JS layout languages, the HTML markup language were used. **Result.** A DDoS attack of the account blocking type, its possible consequences and existing protection mechanisms are considered in detail. Also, in order to counteract the implementation of this attack, a modification of the algorithm is proposed, which can significantly reduce the likelihood of its successful implementation. The result of this work is the developed software tool and a comparative analysis with similar products on the market. **Conclusion.** Ready-made software solutions are analyzed and a protection mechanism is developed, which is a modern solution that provides reliable protection of user accounts and protected from attacks directed at them.

Keywords: DDOS attack, blocking, accounts, attack implementation mechanism, attack countermeasures, attack neutralization algorithm

For citation: P.V. Razumov, L.V. Cherkesova, E.A. Revyakina, A.A. Klevtsov. Protection mechanism against ddos attack intended to block account. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2025;52(2):139-149. (In Russ)DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-2-139-149

Введение. На сегодняшний день имеется огромное количество пользовательских платформ, использующих для авторизации учётные записи пользователя. С каждым днем их становится все больше, они внедряются повсеместно и хранят в себе конфиденциальные данные, которые должны защищаться от атак злоумышленника.

Так, в последнее время наблюдается значительное количество DDoS-атак на ключевые российские компании топливно-энергетического сектора, финансовой отрасли, производственной сферы и телеком-индустрии. Атакам подверглось большое количество крупных организаций. И непосредственно для обеспечения безопасности и возможности своевременного доступа пользователя к своей учётной записи разрабатываются новые и совершенствуются уже имеющиеся механизмы защиты [1].

Кроме того, на сегодняшний день совершенствование подходящей административной структуры в Российской Федерации укрепляет наиболее распространенный способ вывода такого рода инноваций на передовой рынок. Наиболее перспективными подходами в области данных являются использование криптографических методов для защиты данных для различных целей, включая использование государственными органами и бизнес-ассоциациями, средствами электронной коммерции, использование методов шифрования и методов защиты веб-ресурсов от DoS-атак.

В текущей работе подробным образом рассматривается DDoS-атака типа блокирования учётных записей, ее возможные последствия и существующие механизмы защиты. Также, с целью противодействия осуществлению данной атаки предложена модификация алгоритма, которая позволяет значительно снизить вероятность её успешного проведения. Результатом данной работы является разработанное программное средство и проведенный сравнительный анализ с аналогичными продуктами на рынке.

Постановка задачи. Целью исследования является программный анализ кибератаки, осуществляемой с целью блокировки учётных записей и реализация механизма защиты.

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи: проанализировать существующие программные решения, применяемые для защиты от различных типов DDoS атак и в частности от атаки, направленной на блокирование учётных записей; исследовать современные методы детектирования сетевых DDoS-атак; проанализировать готовые программные решения и методы борьбы с атаками на учётные записи; на основе проведенного анализа составить алгоритм и схему работы web – сервиса; выполнить программную реализацию и тестирование разработанного программного средства.

Методы исследования. Самой распространённой атакой на учетные записи являются, так называемые, атаки грубой силы (brute-force attack). Данная атака направлена на перебор пароля, способ можно считать эффективным, когда в системе используются довольно простые пароли. Длина и сложность, а также использование специальных символов сильно затрудняют атаку. Также достаточно часто используется обратная атака грубой силы, когда один распространенный пароль проверяется сразу на многих логинах пользователей.

Атака по словарю, dictionary attack. Данный метод использует часто используемые повседневные слова и фразы. Такие списки злоумышленники формируют на этапе сбора информации, либо используют уже готовые словари.

Гибридная атака представляет собой объединение атаки по словарю и грубой силы. Таким образом, такая атака, вместо того, чтобы перебирать каждый пароль, использует

незначительные модификации слов, отдельных символов по всему словарю, что иногда приводит к реализации атаки.

Атака по радужным таблицам: данный метод отличается от перечисленных выше атак тем, что взламывает не пароли, а хеш-функцию паролей. Такими способом злоумышленники предварительно вычисляют таблицу данных, содержащую кэш хеш-алгоритмов и производит взлом пароля автономно.

Так как успешное выполнения атаки account lockout приводит к отказу в обслуживании системы или сервера, рассмотрим атаки этого типа. Атака блокировки учётных записей является атакой типа отказа в обслуживании или распределенной при атаке с разных устройств не ограниченного количества. Так как при блокировании большого количества учётных записей на сервер поступает огромное количество запросов, не каждая система сможет стабильно обрабатывать такой поток информации в связи с чем рядовой пользователь не сможет получить доступ к Web-сайту. Особенно актуально защищаться от данного типа атак в данное время, в расцвет кибервойн и кибертерроризма. Таким образом данная атака относится к атакам прикладного уровня и реализуется посредством HTTP – POST, HTTP – GET запросов, ботов и серверов, реализующих атаки на учётные записи.

Существующие методы защиты постоянно совершенствуются, но зачастую защищают владельца аккаунта от атак, направленных на перебор или подбор пароля, но при этом используя как один из методов борьбы с злоумышленником – блокировку учётной записи. Учётная запись – это хранимая на сервере или на компьютере пользователя совокупность данных, необходимых для его авторизации и предоставления доступа к его конфиденциальным, личным данным. Это рабочий и распространённый способ борьбы с угрозами данного типа, но не стоит забывать какие последствия может повлечь за собой данный способ, а именно невозможность пользователя своевременно получить доступ к своей учётной записи, а для сервиса блокирования учётных записей в огромном количестве может привести только к одному исходу – отказу в обслуживании, что влечет для компании финансовые потери. На практике сталкиваясь с такими атаками многие сервисы чтобы избежать отказа в обслуживании сервера, перестают блокировать учётные записи, что позволяет злоумышленнику провести свою атаку и в последствии заполучить пользовательские данные.

Рассмотрим уже существующие механизмы защиты в онлайн сервисах. Стоит отметить, что количество таких программ постоянно и все они имеют свои особенности, и более подробные методы приведены ниже в табл. 1.

Таблица 1. Способы защиты от DDOS – атак
Table 1. Methods of protection against DDOS attacks

Механизмы защиты от DDOS – атак DDOS attack protection mechanisms						
Фильтрация Filtration		По ресурсам By resources			Безопасность подключения Connection security	
Пакеты Packages	Потоки Streams	Изменение количества ресурсов Changing the amount of resources	Перенос ресурсов Transfer of resources	Разграничение ресурсов Resource delineation	SSL / TLS	Шифрование запросов Encrypting requests

Рассматривая тип атаки на account lockout в первую очередь, нужно правильно защищаться от всевозможных атак, реализуемых посредством HTTP – запросов и ботами, и различными программными средствами по перебору паролей. При этом самый простой метод защиты от HTTP – атак это переход на безопасное SSL/TLS соединение посредством протокола HTTPS и использование внутреннего шифрования запросов с использованием симметричных шифров. Способы защиты от ботов реализовать сложнее, так как поведение бота нужно отличать от поведения реального пользователя для этого реализуют различные фильтры и смарт-сканирование, но только этим проблема не решается ведь как и методы защиты боты также совершенствуются. Наиболее популярным способом защиты от ботов является полностью автоматизированный публичный тест Тьюринга для различения компьютеров и людей.

Основная идея предложить задачу, легко решаемую человек и крайне сложно решаемую компьютером. Имеет огромное количество реализаций, но существует один недостаток – не всегда можно разобрать текст, иногда приходится вводить по несколько раз. Хотя это достаточно простой способ затрудняющий перебор пароля, его используют далеко не все онлайн сервисы. К тому же если у злоумышленника нет цели похитить данные, ведь для этого нужно иметь идентификатор пользователя номер телефона или логин, а просто заблокировать учётную запись, многие сервисы не защищены от атак такого типа. Исходя из данных представленной таблицы, можно заметить, что все сервисы имеют свой механизм защиты частично отличающиеся друг от друга. Где не используется *Captcha* после определенного количества некорректного ввода данных авторизации идет блокировка входа в учётную запись. Многие большие компании, на которые направленная данная атака, просто не блокируют записи пользователя чтобы не блокировать сервис целиком, что дает возможность злоумышленнику попробовать перебрать пароль. Чтобы добиться максимальной защиты от блокировки учётных записей, так и от атак, нацеленных на перебор и подбор пароля пользователя, стоит не только использовать один из перечисленных методов, но и их комбинацию. Методы подробно перечислены в табл. 2.

Таблица 2. Методы защиты от атак на учётные записи

Table 2. Methods of protection against attacks on accounts

Способы осуществления Methods of implementation	Методы защиты Methods of protection			
HTTP	SSL/TLS (HTTPS – соединение) compound		Шифрование POST и GET запросов Encryption of POST and GET requests	
Боты Bots	Анализ трафика Traffic analysis	Межсетевые экраны Firewalls	Компьютерные тесты Computer tests	Блокирование опасного трафика Blocking dangerous traffic
Перебор пароля Password Brute Force	Современные требования к паролю Modern password requirements		Хеширование данных авторизации в БД Hashing authorization data in the database	

Рассматривая методы борьбы с онлайн атаками, можно заметить, что одним из самых распространенных способов предотвращения похищения данных в следствии перебора пароля является блокировка учётной записи пользователя. Но это ограничит своевременный доступ пользователя к его личному кабинет и доступ к полноценному функционалу нужного интернет-ресурса.

Для того чтобы обезопаситься от возможности данной атаки, рассмотрим следующие подходы:

- Переход от стандартного протокола HTTP на HTTPS. Htps – расширение протокола передачи данных (HTTP) который обеспечивает шифрование соединения, что в свою очередь защитит от прослушивания сетевого соединения и затруднит или не допустит выполнение атаки реализующиеся с помощью POST и GET - запросов.
- Использование внутреннего шифрования POST и GET запросов, посредством симметричного алгоритма шифрования, чтобы обезопасить передачу данных.
- Хранение учётных данных в хешированном виде. В случае перехвата данных, хакер не сможет ими воспользоваться без предварительной расшифровки.
- Реализация анализа трафика и блокирование потенциально опасных подключений, для защиты от ботов и атак с распределённых устройств.
- Использовании программного средства по типу *Captcha*, при превышении попыток ввода неверных данных авторизации, что замедлит выполнение атаки.
- Добавления скрытого поля, при заполнении которого данные на сервер отправляться не будут. Это дополнительная защита от ботов.

- Рандомизация времени блокировки учётных записей пользователей для затруднения выполнения атаки, и возможность пользователя разблокировать свою учётную запись с помощью своей электронной почты.
- Использование современных требований к паролю при регистрации для усложнения перебора пароля злоумышленником, что при современных требованиях безопасности может увеличить затраты времени на сотни лет.

Используя данные методы, получим схему работы web-сервиса, (рис. 1). Использование данных методов и способов защиты позволит не только защитить аккаунт пользователя от входа злоумышленника и от атак различного вида, таких как атаки посредством HTTP – запросов, перебор пароля, в том числе и в автономном режиме, атаки с использованием ботов для подбора пользовательских данных либо блокирование учётных записей.

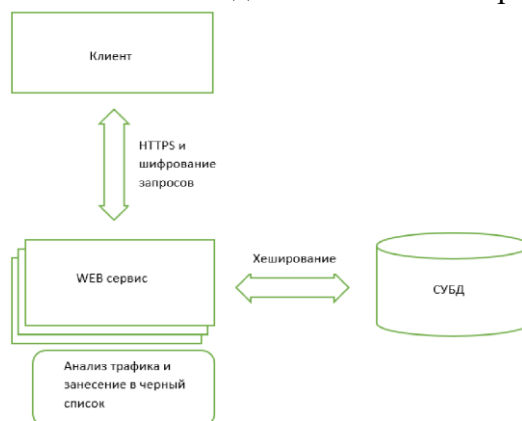


Рис. 1 – Схема работы web – сервиса

Fig. 1 - Web service scheme

Обсуждение результатов. Для разработки программного средства был выбран язык PHP, так как этот язык зарекомендовал себя как один из самых популярных и широко используемых языков в веб-разработке. Вместе с языком программирования была выбрана IDE PhpStorm от компании JetBrains, которая выпускает продукты практически для всех популярных на данный момент языков программирования, так же ее продукты зарекомендовали себя как многофункциональные и удобные IDE для разработки и ведения контроля версий. Помимо данного языка использовались языки верстки CSS и JS, язык разметки HTML.

PHP — скриптовый язык общего назначения, интенсивно применяемый для разработки веб-приложений. В настоящее время поддерживается подавляющим большинством хостинг-провайдеров и является одним из лидеров среди языков, применяющихся для создания динамических Web-сайтов [3 – 9]. Является сравнимо быстрым языком, сравнивая с более популярным Python и более молодым Golang, является удобным и сравнимо быстрым, хоть и использует интерпретатор.

Ajax — асинхронный JavaScript и XML, подход к построению интерактивных пользовательских интерфейсов веб-приложений, заключающийся в «фоновом» обмене данными браузера с веб-сервером [10 – 16].

В качестве базы данных было использованное современное СУБД MySQL на базе программного пакета MAMP. Разработанное программное средство можно использовать как встраиваемый механизм защиты любых страниц авторизации или регистрации.

Программное средство соответствует следующим требованиям к надежности:

1. Требования к надежности пароля по современным стандартам;
2. Использование HTTPS протокола для защищенного соединения;
3. Шифрование запросов с помощью симметричного алгоритма шифрования, в данном случае AES 256;
4. Хеширования пользовательских данных авторизации (login, password) и хранение на сервере в базе данных;

5. Наличие компьютерного теста *Captcha*;

6. Автоматическое блокирование потенциально опасных соединений.

Написанный алгоритм шифрования AES 256 хранится в отдельном файле `aes.php`. На рис. 2 приведена структура данного алгоритма. При создании программного средства использовался ранее локальный Web-сайт со страницей регистрации и входа с использованием AJAX-технологии.

```
class Aes
{
    // основная ф-я шифрования
    public static function cipher($input, $w)
    {
        $Nb = 4; //
        $Nr = count($w) / $Nb - 1; // количество раундов: 10/12/14 для ключей 128/192/256-бит

        $state = []; // 4xNb state
        for ($i = 0; $i < 4 * $Nb; $i++) {
            $state[$i % 4][floor($i / 4)] = $input[$i];
        }

        $state = self::addRoundKey($state, $w, $nd: 0, $Nb);

        // применить Nr раундов
        for ($round = 1; $round < $Nr; $round++) {
            $state = self::subBytes($state, $Nb);
            $state = self::shiftRows($state, $Nb);
            $state = self::mixColumns($state, $Nb);
            $state = self::addRoundKey($state, $w, $round, $Nb);
        }

        $state = self::subBytes($state, $Nb);
        $state = self::shiftRows($state, $Nb);
        $state = self::addRoundKey($state, $w, $Nr, $Nb);

        $output = [4 * $Nb];
    }
}
```

Рис. 2 - Алгоритм AES

Fig. 2 - AES algorithm

Взаимодействие с программой начинается с попадания на страницу входа. При регистрации задается требование надежности логина и пароля, требования к паролю задавались, опираясь на документацию компании Касперский, которая сформировала современные рекомендации, ставшие общепринятыми: обязательно требуется использовать заглавные и строчные буквы, цифры, пробелы и специальные символы, набранные на разных регистрах; пароль должен содержать не менее 8 символов; данные для авторизации не должны совпадать; пароль не должен содержать фразы, которые легко подобрать. Например: login, parol, qwerty, qazwsxedc или abcdefg, 0123456789.

Схема реализации шифрования POST и GET запросов представлена на рис. 3:

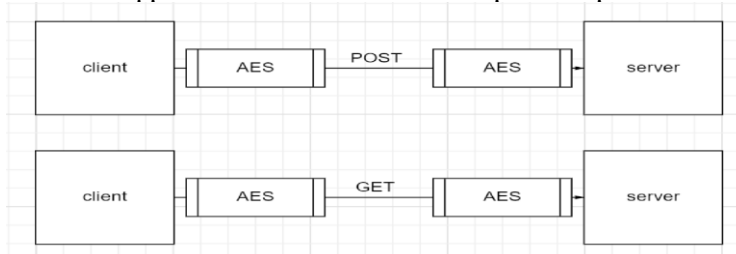


Рис. 3 - Схема шифрования запросов

Fig. 3 - Request ciphering scheme

Структура локального Web-сайта состоит из шести блоков. Первый блок подкаталог Ajax в котором происходит обработка авторизации и регистрации с использованием данной технологии. Второй блок подкаталог blocks в котором содержатся в котором содержатся не изменяемые части страницы, размещенные в отдельные файлы для удобства подключения. Третий блок css, содержит в себе файлы данного языка, использовавшиеся для верстки. Четвертый блок fonts, это используемые шрифты. Также подкаталог img хранящий в себе

используемые на Web-сайте изображения. И корневой каталог, содержащий в себе используемые файлы и страницы. На рис. 4 представлена директория локального Web-сайта.

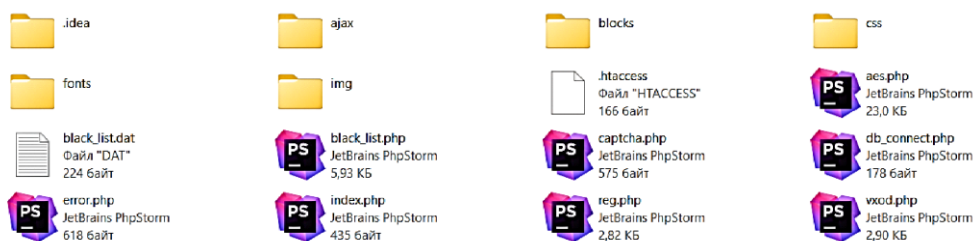


Рис. 4 - Директория Web-сайта
 Fig. 4 - Website folder

На рис. 5 представлена структура локального Web-сайта, со всеми файлами во вложенных директориях.

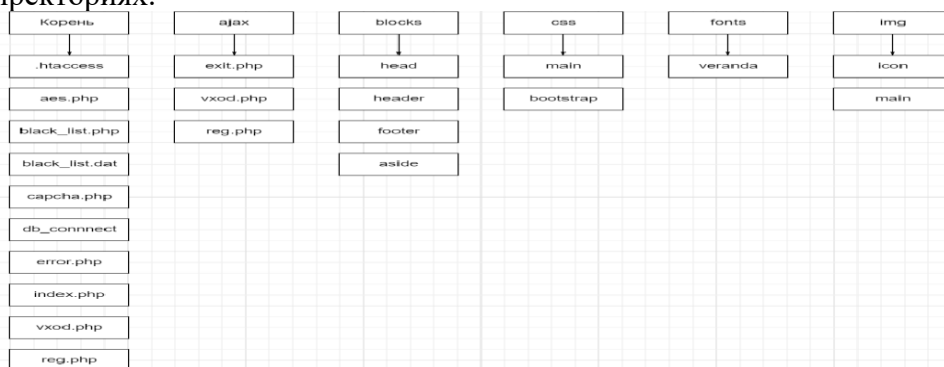


Рис. 5 - Структура Web-сайта
 Fig. 5 - Website structure

Файл .htaccess обрабатывает ошибки подключения к страницам Web-сайта и хранит в себе заблокированные IP адреса, т.е. подключения с которых был потенциально опасный трафик, а так же IP адреса с которых имеется возможность заниматься администрированием Web-сайта. Для обработки был написан так называемый межсетевой экран, который представлен в файле black_list.php и фильтрует поступающий трафик, т.е. все подозрительные подключения будут записаны в black_list.dat и заблокированы. Таким образом, нагрузка на сервер упадет.

Хранение пароля в базе данных в шифрованном виде реализовано с помощью хеш-функции sha256, что видно на рис. 6. Использование данной хеш-функции является важным аспектом безопасности, так как она является современным и криптостойким решением на сегодняшний день. Сравнивая ее с sha512, по криптостойкости они будут примерно равны, но при этом другие, достаточно известные решения, такие, как md5 и sha1 использовать уже не целесообразно, так как они уже были ранее взломаны.

```
if (strlen($email)<=8)
    $error = 'Введите имейл';

if (strlen($pass) < 8)
    $error = "Password too short!";

if (!preg_match( pattern: "[0-9]+#", $pass))
    $error = "Password must include at least one number!";

if (!preg_match( pattern: "[a-zA-Z]+#", $pass))
    $error = "Password must include at least one letter!";

$pass = hash( algo: 'sha256', $pass);
```

Рис. 6 - Обработка пароля
 Fig. 6 - Password processing

При начале работы с программой заходим на первичную страницу регистрации пользователя, показанной на рис. 7, где обязательно происходит проверка на надежность пароля и занесение пользовательских данных в хешированном виде непосредственно в БД с помощью SQL запросов.

Рис. 7 - Окно регистрации

Fig. 7 - Registration window

После первичной регистрации при выходе из учётной записи появится окно авторизации, где и можно проверить работоспособность механизма защиты. При вводе одного и того же пароля выводит сообщение «неверный логин или пароль», что показано на рис. 8, при этом все POST и GET запросы перед на стадии отправки клиентом и расшифровывается непосредственно на сервере, посредством симметричного алгоритма шифрования AES.

Рис. 8 - Ошибка авторизации

Fig. 8 - Registration failure

Если попытаться вводить не корректные данные авторизации будет выводиться сообщение и появляться *Captcha*, показано на рис. 9. Такие действия затруднят перебор или подбор пароля, так как некоторые боты не поддерживают ввод капчи либо увеличат время, затрачиваемое на атаку. Блокироваться данная учётная запись будет при 10 ошибках авторизации, при это блокироваться будет на непродолжительное и случайное время.

Рис. 9 - Работа Captcha

Fig. 9 - Captcha login prevention

Следующий шаг авторизации пользователя при попытке входа в учётную запись уже с верным паролем. Появится диалоговое окно аутентификации по коду их письма по электронной почте, что является одной из вариации защиты от атаки фишинга. При некорректном вводе, учётная запись блокироваться не будет, но, чтобы защитить конфиденциальные данные пользователя от злоумышленника, после пятого неправильного ввода секретного пароля, появится *Captcha*, которая сильно затруднит хакеру его манипуляции с перебором или подбором символов.

Данный механизм имеет ряд преимуществ по сравнению с аналогами:

- Возможность использовать программные средства бесплатно.

- Имеет перспективу в модификации. Как важный аспект данный механизм можно дорабатывать, улучшать скрипты и добавлять свои методы защиты, чтобы улучшить защиту от различных кибератак.
- Не нагружает систему. Так как все используемые средства встроены в локальный Web-сайт и работают на достаточно быстром языке программирования.
- Не занимает много места, так как весь механизм легко разработчиками может быть встроен в любой Web-сайт.
- Может работать совместно с другими программами, что позволит защищаться от компьютерных атак различного типа.

Вывод. Можно сделать вывод, что механизм защиты использует современные требования к обеспечению безопасности пользовательских данных, успешно справляется с защитой от атак нацеленных на блокировку учётных записей, а также несколько других DOS-атак.

Существует ряд рекомендаций, которым пользователю следует придерживаться, чтобы защитить себя от DOS-атак [11–16]:

1. Уменьшение зон, доступных для атаки. Этого можно добиться, ограничив доступ к портам, протоколам или приложениям, взаимодействие с которыми не предусмотрено, в том числе ограничить прямой интернет-трафик к серверам БД.
2. План масштабирования. В данном пункте необходимо выделить два элемента: пропускная способность и производительность сервера. Пропускная способность (транзитивный потенциал) – необходимо размещать ресурсы в непосредственной близости с конечными пользователями и крупными узлами межсетевого обмена трафиком. Производительность сервера – чем лучше производительность сетевых интерфейсов и сетевая конфигурация, тем лучше будет происходить обработка больших объемов трафика.
3. Сведения о типичном и нетипичном трафике. Сбор сведений о нетипичном и трафике, его анализ и блокировка потенциально опасного.
4. Развертывание брандмауэров для отражения сложных атак уровня приложений. Использование межсетевых экранов позволит противодействовать попыткам внедрения SQL – кода или подделки межсетевых запросов, а так же фильтрация и ограничение трафика и работу сторонних приложений.
5. Использование безопасного подключения HTTPS, как способ защиты от HTTP флуда, а также сторонних механизмов защиты от различных спам и флуд атак, реализующиеся в том числе и ботами.

В результате исследования все поставленные цели были достигнуты: проведено исследование компьютерных атак; произведен анализ существующих механизмов защиты; разработана программная реализация механизма защиты; проведен сравнительный анализ реализованного механизма защиты с аналогами и модификациями.

Тестовая среда, используемая для атаки, не смогла обмануть программное средство. Тестирование прошло успешно, что доказывает о правильности работы расширения и возможности в перспективе модификации её. Проведенные исследования еще раз доказывают, что каждый пользователь должен себя обезопасить от любых несанкционированных угроз. Поэтому были анализированы наиболее распространенные типов кибератак приводящие к блокировке учётных записей, а также были представлены общие рекомендации по защите от кибератаки account lockout. Механизм защиты является современным решением, обеспечивающим и надежную защиту учётных записей пользователей и защищенных от атак на них направленных.

Библиографический список:

1. Razumov P.V., Safaryan O.A., Cherckesova L.V., et all. “Developing of Algorithm of HTTP Flood DDoS Protection”, IEEE 3rd International Conference on Computer Applications & Information Security, IEEE ICCAIS’20. Saudi Arabia, Er-Riyadh, 2020. p.6.

2. Burnett M., Foster J. "Hacking the Code", ASP.NET Web Application Security, 2004.
3. Бабенко, Л.К. Современные алгоритмы блочного шифрования и методы их анализа: учебное пособие для студентов вузов / Л.К. Бабенко, Е.А. Ищукова. — Москва: Гелиос АРВ, 2006. 376 с.
4. Стариков А.А., Лысенко А.В., Клевцов А.А. Разработка и анализ скорости работы блочного симметричного алгоритма шифрования AES с использованием различных языков программирования, Молодой исследователь Дона, 2022. № 4 (37)
5. Баранова Е.К., Гырнец К.В. Моделирование и анализ безопасности и риска в сложных системах Труды Международной научной школы МАБР. 2016. СПб. ГУАП, 2016. С. 155–161.
6. Панасенко С.П. Алгоритмы шифрования. Спец. справочник. СПб. БХВ–Петербург, 2009. 576 с.
7. Habr. Как устроен AES/habr.com: [сайт]. URL:<https://habr.com/ru/post/112733/> (дата обр: 02.05.20 22).
8. Al-Odat Z., Abbas A., Khan S. Randomness Analyses of the Secure Hash Algorithms, SHA-1, SHA-2 and modified SHA, 2019 International Conference on Frontiers of Information Technology (FIT), 2019. Pp. 3160-3165. doi: 10.1109/FIT47737.2019.00066
9. Karthiga S., Velmurugan T. Security based Approach of SHA-384 AND SHA-512. Algorithms in Cloud Environment. J. of Computer Science, 2019. Vol. 16(10) Pp. 1439–1450. DOI:10.3844/jcssp.2020.1439.1450
10. Dong X., Sun S., Shi D. Quantum Collision Attacks on AES-like Hashing with Low Quantum Random Access Memories, Advances in Cryptology. ASIACRYPT–2020, South Korea, Daejeon, Springer International Publishing, Vol. 12492. Pp.727–757 DOI: 10.1007/978-3-030-64834-3
11. Razumov P., Safaryan O., Cherckesova L., et all. IAS'2019 Cryptographic Protocol Allowing to Protect the Key in the Open Communication Channel, 3rd International Conference on Computer Applications & Information Security, 2020. p. 1–5. DOI:10.1109 "http://dx.doi.org/10.1109/ICCAIS48893.2020.9096729"
12. Короченцев Д.А., Черкесова Л.В., Ревякина Е.А. и др. Импортзамещающие технологии обеспечения информационной безопасности и защиты данных: Уч. пособие. Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2021 – 335 с.
13. Shui Yu. Distributed Denial of Service Attack and Defense", Springer Briefs in Computer Science, 2014
14. Özçelik İ., Brooks R. Distributed Denial of Service Attacks, Chapman and Hall / CRC, 2020
15. Ibrahim S.A., Mohammad S., Khader S. Proc. Computer Science. Chapman and Hall/CRC, 2016, Pp. 7–15
16. PHP. Справочная информация / php.net: [сайт]. URL: <https://www.php.net/> (дата обр. 01.05.2022)

References:

1. Razumov P.V., Safaryan O.A., Cherckesova L.V., et all. "Developing of Algorithm of HTTP Flood DDos Protection", IEEE 3rd International Conference on Computer Applications & Information Security, IEEE ICCAIS'20. Saudi Arabia, Er-Riyadh, 2020. p.6.
2. Burnett M., Foster J. "Hacking the Code", ASP.NET Web Application Security, 2004.
3. Babenko, L.K. Modern block cipher algorithms and methods of their analysis: a tutorial for university students / L.K. Babenko, E.A. Ishchukova. - Moscow: Helios ARV, 2006. 376 p.
4. Starikov A.A., Lysenko A.V., Klevtsov A.A. Development and analysis of the performance of the block symmetric encryption algorithm AES using various programming languages, Young researcher of the Don, 2022;4 (37)
5. Baranova E.K., Gyrnets K.V. Modeling and analysis of security and risk in complex systems Proceedings of the International Scientific School of the International Academy of Sciences of the Russian Academy of Sciences. 2016. St. Petersburg. GUAP, 2016. Pp. 155–161.
6. Panasenko S.P. Encryption algorithms. Special reference book. St. Petersburg. BHV-Petersburg, 2009:576
7. Habr. How AES works/habr.com: [site]. URL: <https://habr.com/ru/post/112733/> (date of receipt: 02.05.20 22).
8. Al-Odat Z., Abbas A., Khan S. Randomness Analyzes of the Secure Hash Algorithms, SHA-1, SHA-2 and modified SHA, 2019 International Conference on Frontiers of Information Technology (FIT), 2019. Pp. 3160-3165. doi: 10.1109/FIT47737.2019.00066
9. Karthiga S., Velmurugan T. Security based Approach of SHA-384 AND SHA-512. Algorithms in Cloud Environment. J. of Computer Science, 2019;16(10):1439–1450. DOI:10.3844/jcssp.2020.1439.1450
10. Dong X., Sun S., Shi D. Quantum Collision Attacks on AES-like Hashing with Low Quantum Random Access Memories, Advances in Cryptology. ASIACRYPT–2020, South Korea, Daejeon, Springer International Publishing, Vol. 12492. Pp.727–757 DOI: 10.1007/978-3-030-64834-3
11. Razumov P., Safaryan O., Cherckesova L., et all. IAS'2019 Cryptographic Protocol Allowing to Protect the Key in the Open Communication Channel, 3rd International Conference on Computer Applications & Information Security, 2020;1–5.DOI:10.1109 HYPERLINK <http://dx.doi.org/10.1109/ICCAIS48893.2020.9096729>"
12. Korochentsev D.A., Cherkesova L.V., Revyakina E.A. et al. Import-substituting technologies for ensuring information security and data protection: Tutorial. Rostov-on-Don: DSTU, 2021 – 335 p.
13. Shui Yu. Distributed Denial of Service Attack and Defense", Springer Briefs in Computer Science, 2014
14. Özçelik İ., Brooks R. Distributed Denial of Service Attacks, Chapman and Hall / CRC, 2020
15. Ibrahim S.A., Mohammad S., Khader S. Proc. Computer Science. Chapman and Hall/CRC, 2016, Pp. 7–15
16. PHP. Reference / php.net: [site]. URL: <https://www.php.net/> (date obr. 01.05.2022)

Сведения об авторах:

Разумов Павел Владимирович аспирант 3 курса, кафедра «Кибербезопасность информационных систем»; razumov1996@inbox.ru; ORCID0000-0003-2454-3600

Черкесова Лариса Владимировна, доктор физико-математических наук, профессор, профессор, кафедра «Кибербезопасность информационных систем»; chia2002@inbox.ru

Ревякина Елена Александровна, кандидат технических наук, доцент, доцент, кафедра «Кибербезопасность информационных систем»; Revyelen@yandex.ru

Клевцов Алексей Алексеевич, студент, кафедра «Кибербезопасность информационных систем»; prazumov96@gmail.com

Information about authors:

Razumov Pavel Vladimirovich, 3rd year Postgraduate student, Department of Cybersecurity of Information Systems; razumov1996@inbox.ru; ORCID0000-0003-2454-3600

Larisa V. Cherkesova, Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Prof., Prof., Department «Cybersecurity of information Systems»; chia2002@inbox.ru

Elena A. Revyakina, Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Assoc. Prof., Assoc. Prof., Department «Cybersecurity of information systems»; Revye-lena@yandex.ru

Aleksey A. Klevtsov, Student, Department of Cybersecurity of Information Systems; razumov96@gmail.com

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/ Received 15.12.2024.

Одобрена после рецензирования/ Reviced 30.01.2025.

Принята в печать/ Accepted for publication 29.04.2025.

Методика нагрузочного тестирования средств межсетевого экранирования

А.М. Садыков¹, Р.Р. Ямалетдинов²

¹Казанский национальный исследовательский технологический университет,

¹ 420015 г. Казань, ул. Карла Маркса, 68, Россия,

² ООО «АйСиЭлСТ»,

² 420029, Казань, ул. Сибирский тракт, д. 34 к.1, Россия

Резюме. Цель. Цель работы заключается в разработке методики нагрузочного тестирования отечественных межсетевых экранов для оценки их реальной пропускной способности и устойчивости под нагрузкой. Это необходимо для проверки соответствия заявленных производителем характеристик предлагаемых средств межсетевого экранирования для использования в конкретных защищенных автоматизированных системах. **Метод.** Метод исследования - эмпирический. Предложен и описан испытательный стенд с генератором трафика Cisco TRex, который эмулирует нагрузку. Созданы шаблоны трафика для имитации различных сетевых условий. Методика тестирования включает три режима: маршрутизация без фильтрации, полная блокировка трафика и фильтрация на уровне приложений. Нагрузка постепенно увеличивается до выявления предельных значений стабильной работы. **Результат.** Для проведения нагрузочного тестирования средств межсетевого экранирования разработана методика проведения испытаний. Определены количественные показатели производительности межсетевого экрана в разных режимах. **Вывод.** Предлагаемая методика предназначена для объективной оценки производительности межсетевых экранов. Она позволяет выбирать оптимальные решения по защите информации, выявлять критические сценарии и предотвращать использование недостаточно производительных решений.

Ключевые слова: информационная безопасность, защита информации, межсетевой экран, методика тестирования, трафик, пропускная способность

Для цитирования: А.М. Садыков, Р.Р. Ямалетдинов. Методика нагрузочного тестирования средств межсетевого экранирования. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025;52(2):150-158. DOI:2025;52(2):150-158. DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-2-150-158

Methodology of load testing of firewalling tools

A.M. Sadykov¹, R.R. Yamaletdinov²

¹Kazan National Research Technological University,

¹68 Karl Marx St., Kazan 420015, Russia,

²«ICIEL System Technologies»,

²34 build 1, Sibirsky Trakt, Kazan, 420029, Russia

Abstract. Objective. The purpose of the work is to develop a methodology for load testing domestic firewalls to assess their real throughput and stability under load. This is necessary to verify the compliance of the characteristics of the proposed firewalls declared by the manufacturer for use in specific protected automated systems. **Method.** The research method is empirical. A test bench with a Cisco TRex traffic generator that emulates the load is proposed. Traffic patterns are created to simulate various network conditions. The testing methodology includes three modes: routing without filtering, complete traffic blocking, and filtering at the application level. The load is gradually increased until the limit values of stable operation are identified. **Result.** A testing methodology was developed to conduct load testing of firewalls. Quantitative indicators of firewall

performance in different modes were determined. **Conclusion.** The proposed methodology is intended for an objective assessment of firewall performance. It allows choosing optimal solutions for information protection, identifying critical scenarios and preventing the use of insufficiently productive solutions.

Keywords: information security, information protection, firewall, testing methodology, traffic, throughput

For citation: A.M. Sadykov, R.R. Yamaletdinov. Methodology of load testing of firewalling tools. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2025; 52(2): 150-158. (In Russ) DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-2-150-158

Введение. Межсетевой экран (МЭ) играет ключевую роль в обеспечении информационной безопасности, выступая в качестве программного или программно-технического средства контроля и фильтрации информационных потоков согласно заданным правилам. Он предназначен для защиты данных некриптографическими методами, в том числе информации ограниченного доступа.

Установка МЭ на границе информационной системы или между ее сегментами позволяет эффективно фильтровать трафик, снижая риски утечек и несанкционированного проникновения как извне, так и внутри локальной сети.

Постановка задачи. Целью исследования является разработка новой методики тестирования отечественных межсетевых экранов, описание ее ключевых особенностей и основных этапов работы, а также обоснование ее необходимости.

Эффективность функционирования межсетевого экрана непосредственно влияет на общий уровень защищённости информационной инфраструктуры. Правильно подобранное и протестированное решение обеспечивает оперативную реакцию на угрозы, оптимальные показатели пропускной способности и совместимость с остальными средствами защиты.

Нагрузочное тестирование выступает критически важным этапом оценки, так как без объективных измерений производительности и устойчивости существует риск выбора неподходящего решения, в результате чего повышается вероятность успешной реализации атак. В рамках таких проверок выявляют реальные возможности МЭ по фильтрации и переработке трафика при высокой нагрузке, оценивают соответствие заявленным характеристикам и проверяют способность устройства сохранять эффективность при изменяющихся условиях эксплуатации.

Так, например, для комплексных решений класса NGFW (Next-Generation Firewall), в которых одновременно функционируют фаервол, система предотвращения вторжений (IPS) и механизм глубокой инспекции пакетов (DPI), производительность анализируется для каждого из компонентов отдельно, что помогает детально оценить потенциал системы в целом.

Современные инструменты, такие как CiscoTrex, позволяют эмулировать реальные сценарии и задавать различные профили трафика, обеспечивая точную оценку производительности [1]. При этом учитываются такие параметры, как предельная пропускная способность, число новых и одновременных соединений, а также поведение системы при увеличении объёмов трафика [2, 3].

Оценка межсетевых экранов может включать различные аспекты и методики. Стандартизированные подходы дают возможность унифицировать результаты тестирования и сопоставлять их с решениями конкурентов. Регулярная проверка МЭ позволяет не только подтвердить соответствие заявленным характеристикам, но и своевременно выявить уязвимости, оценить их критичность посредством рекомендаций стандарта Common Vulnerability Scoring System (CVSS), а также определить удобство и надёжность использования. Таким образом, комплексное тестирование межсетевых экранов выступает в качестве обязательного этапа при выборе и внедрении средств защиты в корпоративную среду.

Исследованию МЭ и их тестированию, в том числе с использованием различных методик посвящен ряд работ [5-12]. Тестирование пропускной способности и устойчивости подразумевает нагружение МЭ трафиком различной интенсивности и структуры, измерение задержек, потерь пакетов, времени реакции на изменения нагрузки. Подход описан в современных методиках от ГК «Солар» [2], а также в рекомендациях от ведущих вендоров, регулярно обновляемых в 2023–2024 гг.[4].

Согласно Указа Президента РФ от 1 мая 2022 г. N 250 «О дополнительных мерах по обеспечению информационной безопасности Российской Федерации» с 1 января 2025 г. органам (организациям) запрещается использовать средства защиты информации зарубежного производства [5]. Исходя из этого, в сфере информационной безопасности осуществляется переход на отечественные продукты, поэтому возникает необходимость анализа предлагаемых отечественным рынком средств межсетевого экранирования для использования в защищенных автоматизированных системах.

Компания «АйСиЭлСТ» реализует комплексные проекты в области системной интеграции и информационной безопасности, в том числе построение систем защиты информации объектов критической информационной инфраструктуры. При этом информация о МЭ, доступная непосредственно от производителя, чаще всего представляет собой рекламу, преувеличивающую достоинства и скрывающую недостатки. Для осознанного выбора желательно получить четкое и достоверное описание качественных характеристик продукта, его надежности и уязвимых мест [6]. Одним из этапов такого исследования является нагрузочное тестирование.

Методы исследования. В настоящее время большинство методик тестирования МЭ созданы для зарубежных решений и не учитывают специфику отечественных решений. Это приводит к тому, что оценка их эффективности и безопасности может быть неполной или некорректной.

В связи с этим возникает необходимость в разработке и внедрении в практику специализированной методики, адаптированной под особенности отечественных МЭ с целью тестирования ряда продуктов и проверки их на соответствие заявленным производителями характеристикам.

Для проведения нагрузочного тестирования средств межсетевого экранирования была разработана методика проведения испытаний. Так как, число правил безопасности на межсетевом экране прямо влияют на его производительность, а при эксплуатации firefall политики выстраиваются гибким образом, в методике рассматривается производительность при отработке лишь 1-2 правил - как эталон производительности.

Цель данной методики - вычислить фактическую производительность средства межсетевого экранирования путем генерации нагрузки и эмуляции потока трафика на него. Этапы тестирования, согласно методике, описаны далее.

При проведении тестирования используется ПО «Генератор траффика CiscoTRex», являющееся программным генератором трафика с открытым исходным кодом. Он позволяет воспроизводить разные типы трафика и анализировать данные при их получении [2].

Для тестирования продукта его необходимо соединить с сервером TRex согласно схеме, представленной на рис. 1.

На рис. 1 видно, что TRex выступает в роли как клиента, так и сервера, тем самым эмулируя прохождение трафика через межсетевой экран в другой сегмент сети.

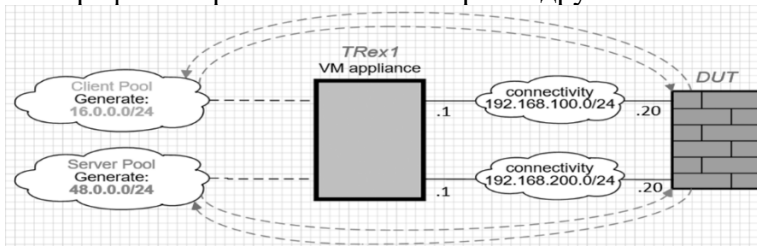


Рис. 1 - Схема подключения оборудования на стенде
Fig. 1 - Wiring diagram of the equipment on the stand

Это подтверждает схема, представленная на рис.2.

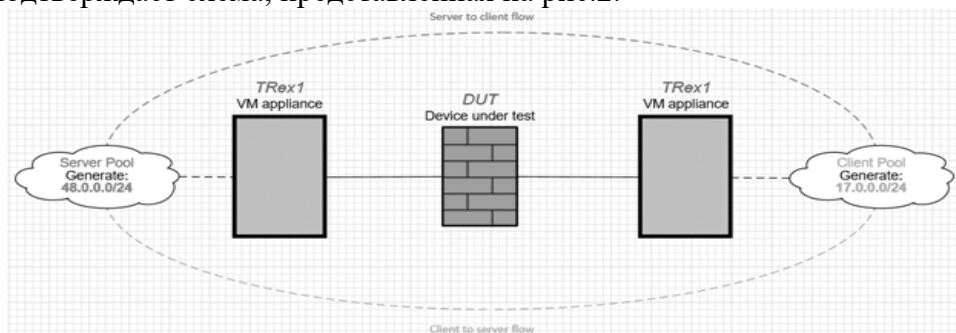


Рис. 2 - Схема потоков трафика в стенде
Fig. 2 - Schematic of traffic flows in the booth

Начальная установка - на тестируемом устройстве необходимо настроить сетевую связь для прохождения пакетов, генерируемых устройством с ПО TRex.

Учитывая архитектурные особенности межсетевого экрана, в разделе политик безопасности необходимо создать первую по списку политику, разрешающую весь сетевой трафик «permitanyany». Также включить логирование трафика для отслеживания правильности обработки и возможности своевременного реагирования на инциденты.

На генераторе трафика TRex необходимо создать шаблоны из существующих в базовой инсталляции «.pcap» файлов. Параметры шаблонов представлены в табл. 1 и 2.

Таблица 1. Шаблон №1 «template_test_1.py»

Table 1. Template #1«template_test_1.py»

Наименование файла .pcap File name	Описание содержимого трафика Description of traffic content	Количество подключений в секунду Number of connections per second
dns_0.pcap	протокол dns, payload 77/93 байт – запрос/ответ	50
delay 10 http browsing 0.pcap	протокол http, payload 1518 байт	100

Таблица2. Шаблон №2 «template_test_2.py»

Table 2. Template #2 «template_test_2.py»

Наименование файла .pcap File name	Описание содержимого трафика Description of traffic content	Количество подключений в секунду Number of connections per second
delay 10 smtp 0.pcap	протокол SMTP, payload 64-1518байт	20
delay_10_citrix_0.pcap	протокол TCP в который вложен трафик приложения, payload 64-1517 байт	30

Процентное соотношение типов трафика в шаблонах, число подключений в секунду для каждого типа трафика — «.pcap» файла, выбирается исходя из представления о содержимом трафика в сети индивидуально. Это соотношение в идеальных условиях измерений подбирается максимально приближенными к реальным по числу TCP и UDP соединений и размеру пакетов. После создания шаблонов запустить генерацию трафика на TRex с использованием шаблона template_test_1.py для проверки работоспособности стенда. Проверить полученные значения, свидетельствующие о корректном беспрепятственном прохождении трафика на основе статистики TRex и соответствующих логах прохождения трафика на межсетевом экране.

1 этап — Измерение пропускной способности сетевого трафика. Целью этапа является определение сетевой пропускной способности и сравнение ее с заявленными характеристиками производителя. Для этого необходимо провести последовательные замеры значений с помощью генерации трафика, подготовленного шаблонами, зафиксировать результаты и найти максимальное значение пропускной способности.

Для измерения пропускной способности трафика в режиме, когда межсетевой экран работает как маршрутизатор — устройство 3 уровня модели OSI, с единственной политикой, разрешающей любой трафик, необходимо убедиться в соответствующих настройках.

Для измерения можно использовать как все подготовленные шаблоны — производить замеры, как и по одному шаблону с фиксацией результатов, затем по следующему, и так далее, так и частью шаблонов, либо один из них, например, `template_test_1.py`.

Шаг 1. Опираясь на заявленные характеристики производителя, выбрать некоторое начальное количество трафика. Например, при условии, что тестируется межсетевой экран с интерфейсом, поддерживающим максимальную скорость 1 Гбит/сек, и заявленной производителем пропускной способностью в 900 Мбит/сек в режиме Firewall — выбрать 800 Мбит/сек, для последующей масштабируемости нагрузки стендирования. Приравнять начальное значение b —bandwidth— «Пропускная способность» 800 Мбит/сек.

Шаг 2. Ориентируясь на b подготовить шаблон таким образом, чтобы суммарный объем трафика составил значение приблизительно равное b . Достигается это изменением в шаблоне значения мультипликатора `cps` — `connectionspersecond` — «Соединения в секунду» для каждого типа трафика (рис.3).

```
return ASTFProfile(default_ip_gen=ip_gen,
    cap_list=[
        ASTFCapInfo(file="/opt/trex/v3.00/avl/dns_0.pcap", cps=1000.0)
        ASTFCapInfo(file="/opt/trex/v3.00/avl/delay_10_http_browsing_0.pcap", cps=2000.0)
    ])

```

Рис. 3 - Значение мультипликатора `cps` для `dns_0.pcap`

Fig. 3 - Value of `cps` multiplier for `dns_0.pcap`

Шаг 3. Произвести первый замер с подготовленным шаблоном, после чего записать результаты статистики с TRex в табличном виде. Далее повторить шаги с 1 по 3, увеличивая b при каждой итерации на 5% в соответствии с формулой 1.

$$bn = 1,05 \times b(n - 1), \quad (1)$$

где bn — значение пропускной способности при n -ом замере, Мбит/сек; $bn - 1$ — значение пропускной способности при $(n-1)$ -ом замере, Мбит/сек.

Замеры повторять до тех пор, пока не будут зафиксированы потери, превышающие 2% пакетов в статистике, выдаваемой TRex. После нахождения значения bn выполнить ряд замеров с шагом 1% в сторону уменьшения в соответствии с формулой 2.

$$bcn = 0,99 \times bc(n - 1), \quad (2)$$

где bcn — значение пропускной способности при n -ом замере, Мбит/сек; $bcn - 1$ — значение пропускной способности при $(n-1)$ -ом замере, Мбит/сек.

Замеры повторять до тех пор, пока в статистике TRex потери пакетов не опустятся ниже уровня в 2%. Таким образом будет найдено максимальное значение пропускной способности, при котором на интересующем нас профиле трафика межсетевой экран выдает максимальные значения производительности — $bmax$ в качестве устройства 3 уровня модели OSI без проверок, инспекций и политик безопасности.

2 этап — Измерение производительности в режиме Firewall. Целью этапа является определение производительности межсетевого экрана при настроенной политике «denyanyany» и сравнение с заявленными характеристиками производителя. Для этого необходимо провести последовательные замеры значений с помощью генерации трафика подготовленными шаблонами и зафиксировать результат, найти максимальное значение трафика, при котором межсетевой экран продолжит корректно обрабатывать — блокировать весь генерируемый трафик, логируя и оставаясь доступным для управления.

Для измерения производительности межсетевого экрана в режиме блокировки всего трафика необходимо настроить запрещающую весь сетевой трафик политику «denyanyany» и либо сделать ее единственной в списке политик, либо переместить вверх.

Шаг 1. В качестве первого замера использовать значения для шаблонов, которые были использованы при последнем замере из предыдущего этапа — значения `cps` выставленные в шаблонах при нахождении $bmax$.

Если на данном шаге весь трафик был корректно заблокирован межсетевым экраном, лог об этом был соответствующим образом сгенерирован и межсетевой экран не потерял управление — оставался доступным для управления во время проведения замера, то дальнейшие шаги не выполняются, так как найдено искомое значение. При этом значение f равняется максимальной пропускной способности межсетевого экрана и является искомым значением f_{max} — максимальная производительность firewall в режиме блокировки всего трафика.

Шаг 2. Если на предыдущем шаге рассматриваемые показатели не были достигнуты - доступность для управления, корректное логирование, блокирование всего проходящего через межсетевой экран трафика, перейти к следующему измерению уменьшая значение f на 10% пропорционально уменьшая cps для $rsar$ в используемом шаблоне в соответствии с формулой 3.

$$fn = 0,9 \times f(n - 1), \quad (3)$$

где fn — значение производительности firewall в режиме блокировки всего трафика при n -ом замере, Гбит/сек; $f(n - 1)$ — значение производительности firewall в режиме блокировки всего трафика при $(n-1)$ -ом замере, Гбит/сек.

Замеры повторять до тех пор, пока не будут зафиксированы отслеживаемые показатели: доступность для управления, корректное логирование, блокирование всего проходящего через межсетевой экран трафика. Как только будет найдено значение fn при котором все показатели стабильны, приступить к замерам в сторону увеличения на 1% в соответствии с формулой 4.

$$fcn = 1,01 \times fc(n - 1), \quad (4)$$

где fcn — значение производительности firewall в режиме блокировки всего трафика при n -ом замере, Мбит/сек; $fc(n - 1)$ — значение производительности firewall в режиме блокировки всего трафика при $(n-1)$ -ом замере, Мбит/сек.

Таким образом будет найдено максимальное значение трафика, при котором межсетевой экран способен его корректно блокировать. Замеры повторять до тех пор, пока отслеживаемые показатели не начнут деградировать. Последний замер, при котором показатели были корректны и будет искомым значением f_{max} , являющимся максимальной производительностью межсетевого экрана в режиме блокирования всего трафика.

3 этап — Измерение производительности Firewall с использованием «Application Control». Целью этапа является определение производительности межсетевого экрана при настроенных политиках блокировки приложений «denyapplication (smtp, citrix)» и сравнение с заявленными характеристиками производителя. Для этого необходимо провести последовательные замеры значений с помощью генерации трафика подготовленными шаблонами, зафиксировать результаты, найти максимальные значения трафика, при котором межсетевой экран продолжит корректно обрабатывать — блокировать весь генерируемый трафик приложений, логируя, оставаясь доступным для управления.

Во время тестирования будет осуществляться блокировка трафика приложений smtp и citrix. При этом трафик приложения smtp — SimpleMail Transfer Protocol — является стандартизированным протоколом и имеет свой номер и может быть идентифицирован по флагам в заголовках пакета. Трафик приложения citrix должен распознаваться по сигнатурам на основе payload, так как не имеет своих идентификаторов в заголовках сетевых пакетов. Для измерения производительности межсетевого экрана в режиме Firewall с использованием «Application Control» необходимо настроить запрещающую политику «denysmtp, citrix» и либо сделать ее единственной в списке политик, либо переместить вверх. После нее необходимо добавить разрешающую политику «permitanyany» — в случае если тестируемое устройство не распознает трафик приложений, он будет пропущен.

Шаг 1. В качестве первого замера выбрать значение, соответствующее f_{max} его параметрами шаблона. Произвести замер, записать полученные результаты в табличном виде.

Если на данном шаге весь трафик был корректно заблокирован межсетевым экраном, лог об этом был соответствующим образом сгенерирован и межсетевой экран не потерял управление - оставался доступным для управления во время проведения замера, то дальнейшие шаги не выполняются, так как найдено искомое значение. При этом значение App – «firewallwithappcontrol» равняется максимальной пропускной способности межсетевого экрана в режиме блокирования по трафику приложений и является искомым значением App_{max} — максимальной производительностью firewall с использованием «Application Control».

Шаг 2. В случае если на предыдущем шаге рассматриваемые показатели не были достигнуты — доступность для управления, корректное логирование, блокирование всего трафика приложений, проходящего через межсетевой экран, перейти к следующему измерению уменьшая значение App на 10% пропорционально уменьшая cps для $rsar$ в используемом шаблоне в соответствии с формулой 5.

$$App_n = 0,9 \times App(n - 1), \quad (5)$$

где App_n – значение производительности в режиме Firewall с использованием «ApplicationControl» при n -ом замере, Мбит/сек; $App(n - 1)$ – значение производительности в режиме Firewall с использованием «ApplicationControl» при $(n-1)$ -ом замере, Мбит/сек.

Замеры повторять до тех пор, пока не будут зафиксированы отслеживаемые показатели. Как только будет найдено значение App_n при котором все показатели стабильны, приступить к замерам в сторону увеличения на 1% в соответствии с формулой 6.

$$App_{cn} = 1,01 \times App_c(n - 1), \quad (6)$$

где App_{cn} – значение производительности в режиме Firewall с использованием «ApplicationControl» при n -ом замере, Мбит/сек; $App_c(n - 1)$ – значение производительности в режиме Firewall с использованием «ApplicationControl» при $(n-1)$ -ом замере, Мбит/сек.

Замеры повторять до тех пор, пока отслеживаемые показатели не начнут деградировать. Последний замер, при котором показатели были корректны и будет искомым значением App_{max} , являющимся максимальной производительностью межсетевого экрана в режиме Firewall когда блокирование трафика происходит на основе распознавания приложений.

Обсуждение результатов. В данной работе была предложена и рассмотрена методика нагрузочного тестирования средств межсетевого экранирования.

На основе проведенного анализа выявлено, что межсетевые экраны играют ключевую роль в обеспечении информационной безопасности, фильтруя и контролируя сетевые потоки данных. Однако эффективность их работы во многом зависит от соответствия заявленным характеристикам и способности справляться с реальными нагрузками, возникающими в процессе эксплуатации. Разработанная методика позволяет:

- определить пределы производительности межсетевого экрана;
- проверить корректность обработки различных типов трафика;
- выявить критические сценарии, в которых система может давать сбой;
- оценить соответствие заявленным характеристикам производителя.

Использование инструментов, таких как CiscoTrex, и разработка индивидуальных тестовых шаблонов позволяет воспроизвести реальную нагрузку, что особенно важно для анализа работы NGFW-решений.

С помощью данной методики будет проведено исследование средств межсетевого экранирования для защищенных систем, представленных на российском рынке анализ, которых был проведен [13].

Вывод. Предложенная методика нагрузочного тестирования предназначена для проведения оценки соответствия заявленных производителем межсетевых экранов характеристик с полученными в ходе исследований и на основе данных результатов создавать наиболее подходящие решения по информационной безопасности для конкретных организаций.

Библиографический список:

1. TRexDocumentation [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://trex-tgn.cisco.com/trex/doc/> (дата обращения: 10.12.2024).
2. Тестирование межсетевых экранов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://rt-solar.ru/products/solar_ngfw/blog/3959/ (дата обращения: 10.12.2024)
3. Online инструменты для простейшего Pentest-a [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://habr.com/ru/companies/tssolution/articles/323896/> (дата обращения: 10.12.2024).
4. Тестирование межсетевых экранов нового поколения: опыт с Solar NGFW [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.anti-malware.ru/practice/methods/Solar-NGFW> (дата обращения: 10.12.2024).
5. О дополнительных мерах по обеспечению информационной безопасности Российской Федерации: Указ Президента Российской Федерации от 01.05.2022 № 250 (последняя редакция) [Электронный ресурс]. – URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202205010023> (дата обращения: 21.03.2024).
6. Взгляд экспертов на российский рынок межсетевых экранов нового поколения (NGFW) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.anti-malware.ru/analytics/Market_Analysis/NGFW-market-overview-AMLive (дата обращения: 10.12.2024)
7. А.Г. Богораз, О.Ю. Пескова. Методика тестирования и оценки межсетевых экранов // Известия ЮФУ. Технические науки. 2013. № 12 (149). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodika-testirovaniya-i-otsenki-mezhsetevykh-ekranov> (дата обращения: 13.02.2025).
8. Е.А. Васильева, Н.В. Медведев. Методика тестирования межсетевых экранов / Безопасность информационных технологий. – 2008. – Т. 15, № 1. – С. 21-25.
9. А.С. Марков, В.Л. Цирлов, А.В. Барабанов Разработка методики испытаний межсетевых экранов по требованиям безопасности информации. // Вопросы защиты информации, 2011. № 3. С.19-24.
10. В.В. Галимский. Методика нагрузочного тестирования межсетевых экранов / В.В. Галимский, Ю.Е. Подгурский // Неделя науки СПбПУ: Материалы научного форума с международным участием. Институт прикладной математики и механики, Санкт-Петербург, 30 ноября – 05 2015 года / – Санкт-Петербург: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого", 2015. – С. 174-176.
11. Д.А. Свечников. Методика тестирования межсетевых экранов по требованиям безопасности информации / Д.А. Свечников, Д.С. Царев // Информационные системы и технологии. – 2011. – № 3(65). – С. 136-140.
12. А.Г. Богораз. Методика тестирования межсетевых экранов / А.Г. Богораз // Информационное противодействие угрозам терроризма. – 2014. – № 22. – С. 89-92.
13. В.Ф. Ахмадиева. Разработка методики тестирования межсетевых экранов по требованиям безопасности информации, сравнительный анализ методик "Positive technology" и "Digital security" / В.Ф. Ахмадиева, В.Ф. Ахмадиева // Инновационное развитие современной науки: новые подходы и актуальные исследования : сборник материалов Международной научно-практической конференции, Москва, 30 ноября 2023 года. – Москва: Алеф, 2023. – С. 165-169. – doi: 10.26118/5957.2023.71.49.002.
14. А.М. Садыков, Р.Р. Ямалетдинов, Д.И. Сабирова. Российские средства межсетевого экранирования для защищенных систем // Вестник Дагестанского государственного технического университета. 2024. № 4 (51). С. 154-163. doi: 10.21822/2073-6185-2024-51-4-154-163

References:

1. Cisco. TRexOfficialDocumentation. Access: <https://trex-tgn.cisco.com/> (reference date: 10.12.2024). (In Russ.).
2. GK «Solar». Metodika testirovaniya Solar NGFW. URL: https://rt-solar.ru/products/solar_ngfw/blog/3959/ (reference date: 10.12.2024) (In Russ.).
3. Habr. Testirovanie proizvoditel'nosti sistem IB. URL: <https://habr.com/ru/companies/tssolution/articles/323896/> (reference date: 10.12.2024). (In Russ.).
4. Anti-Malware.ru. Metodiki testirovaniya mezhsetevykh jekranov. URL: <https://www.anti-malware.ru/practice/methods/Solar-NGFW> (reference date: 10.12.2024). (In Russ.).
5. On additional measures to ensure information security of the Russian Federation: Decree of the President of the Russian Federation dated 05/01/2022 No. 250 (latest edition) [Electronic resource]. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202205010023> (reference date: 10.12.2024). (In Russ.).
6. Vzgljad ekspertov na rossijskij rynek mezhsetevykh ekranov novogo pokoleneja (NGFW) URL: https://www.anti-malware.ru/analytics/Market_Analysis/NGFW-market-overview-AMLive (reference date: 10.12.2024). (In Russ.).
7. Bogoras A.G.,Peskova O.Yu. Methodology for testing and assessment of firewalls.*Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*. 2013. №12 (149): 148-156.(In Russ.).
8. Vasileva E.A., Medvedev N.V. Methodology for testing of firewalls. IT Security. 2008. № 1(15): 21-25.(In Russ.).

9. Markov A.S., Tsirlov V.L., Barabanov A.V. Development of technique for firewalls security testing. *Information security questions*. 2011;3:19-24. (In Russ.).
10. Podgursky Yu.E. Firewall load testing methodology. Science week SPbPU. *Proceedings of the scientific forum with international participation. Institute of Applied Mathematics and Mechanics*. Saint Petersburg: Publishing House of Polytechnical University; 2015:174-176. (In Russ.).
11. Svechnikov D.A., Tsarev D.S. Firewalls testing technique as information security requires. *Information systems and technologies*. 2011;3(65):136-140. (In Russ.).
12. Bogoraz A.G. Testing methodology firewall. *Information counteraction to terrorism threats*. 2014;22:89-92. (In Russ.).
13. Ahmadiyeva V.F., Fakhmadiyeva V.F. Development of a methodology for testing inter-internet displays on information security requirements, a comparative analysis of "POSITIVE TECHNOLOGY" and "DIGITAL SECURITY" methods. *Innovative development of modern science: new approaches and current research: collection of materials of the International scientific and practical conference*. Moscow: LLC "ALEF publishing house" 2023: 165-169. – doi: 10.26118/5957.2023.71.49.002. (In Russ.).
14. A.M. Sadykov, R.R. Yamaletdinov, D.I. Sabirova. Russian firewall screening tools for secured systems. *Herald of daghestan state technical university. technical sciences*. 2024;4(51):154-163. doi: 10.21822/2073-6185-2024-51-4-154-163. (In Russ.).

Сведения об авторах:

Александр Мунирович Садыков, кандидат технических наук, доцент, кафедра «Информационная безопасность», alex.sadykov@mail.ru. ORCID 0009-0005-8893-7846.

Роман Русланович Ямалетдинов, старший системный инженер; yamaletdinov.r2000@gmail.com.

Information about authors:

Alexander M. Sadykov, Cand. Sci. (Eng), Assoc. Prof., Department of Information Security alex.sadykov@mail.ru, ORCID 0009-0005-8893-7846.

Roman R. Yamaletdinov, Senior Systems Engineer, yamaletdinov.r2000@gmail.com.

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/ Received 06.03.2025.

Одобрена после рецензирования / Revised 26.04.2025.

Принята в печать / Accepted for publication 17.05.2025.

**Интеллектуальный анализ процессов дымообразования на пожарах:
новые подходы на основе ИИ-технологий**

М.В. Шевцов¹, А.Н. Денисов¹, М.В. Иванов¹, А.А. Козлов²

¹ Академия Государственной противопожарной службы МЧС России,

¹ 129366, г. Москва, ул. Б. Галушкина, 4, Россия,

² Департамент надзорной деятельности и профилактической работы МЧС России,

² 121357, г. Москва, ул. Ватутина, 1, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является изучение подходов по созданию интеллектуальной системы, внедрение которой способно повлиять на качество решений, принимаемых руководителем тушения пожара (РТП) в процессе управления личным составом при тушении пожара. **Метод.** В работе использованы методы статистического анализа, теории управления, способы обработки данных и реализации продукционных правил по индексированию, хешированию и кластеризации получаемой информации для её дальней трансформации в базу знаний. **Результат.** В работе приведены статистические данные по травмированию и гибели сотрудников пожарно-спасательных подразделений от термических последствий, вызванных движением газообразных масс на объектах капитального строительства. Продолжен цикл исследований по определению и применению методов и алгоритмов искусственного интеллекта в процессе управления боевыми действиями на месте вызова. Определена недостаточность исследований дымообразующей способности строительных материалов, влияющих на личный состав МЧС России на месте вызова. **Вывод.** Сформулирован алгоритм создания базы данных снимков дыма, образующегося при сгорании различных веществ и материалов, составляющих основную горючую нагрузку в помещениях объектов разного функционального назначения, и предложен классификатор изображений дыма в зависимости от пожарной нагрузки. Приведен пример описания структуры формируемой базы данных на основе существующих имитационных моделей и программных продуктов. Представлена модель формирования базы знаний РТП по анализу дыма в зависимости от типа горючей нагрузки.

Ключевые слова: руководитель тушения пожара, термический газообмен, классификатор изображений, база данных, дымообразование, алгоритм, искусственный интеллект, модель, база знаний

Для цитирования: М.В. Шевцов, А.Н. Денисов, М.В. Иванов, А.А. Козлов. Интеллектуальный анализ процессов дымообразования на пожарах: новые подходы на основе ИИ-технологий. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025; 52(2):159-168. DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-2-159-168

**Intelligent analysis of smoke formation processes in fires:
new approaches based on AI technologies**

M.V. Shevtsov¹, A.N. Denisov¹, M.V. Ivanov¹, A.A. Kozlov²

¹ Academy of the State fire service of the Ministry of emergency situations of Russia,

¹ 4 B. Galushkina St., Moscow 129366, Russia,

² Department of supervision and preventive work Emergency situations of Russia,

² 1 Vatutina St., Moscow 121357, Russia

Abstract. Objective. The aim of the study is to examine approaches to creating an intelligent system, the implementation of which can affect the quality of decisions made by the fire extinguishing manager (FEM) in the process of managing personnel during fire extinguishing. **Method.** The work uses methods of statistical analysis, control theory, data processing methods

and the implementation of production rules for indexing, hashing and clustering of the received information for its further transformation into a knowledge base. **Result.** The paper presents statistical data on injuries and deaths of fire and rescue unit personnel from thermal consequences caused by the movement of gaseous masses at capital construction sites. The research cycle on defining and applying artificial intelligence methods and algorithms in the process of managing combat operations at the call site is continued. The inadequacy of studies of the smoke-forming ability of building materials affecting the personnel of the Russian Emergencies Ministry at the call site is determined. **Conclusion.** An algorithm for creating a database of images of smoke generated during combustion of various substances and materials that constitute the main combustible load in the premises of objects of different functional purposes is formulated, and a classifier of smoke images depending on the fire load is proposed. An example of a description of the structure of the database being formed based on existing simulation models and software products is given. A model for forming a knowledge base of the RTP for smoke analysis depending on the type of combustible load is presented.

Keywords: fire extinguishing manager, thermal gas exchange, image classifier, database, smoke generation, algorithm, artificial intelligence, model, knowledge base

For citation: M.V. Shevtsov, A.N. Denisov, M.V. Ivanov, A.A. Kozlov. A Intelligent analysis of smoke formation processes in fires: new approaches based on AI technologies. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2025; 52(2):159-168. (In Russ) DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-2-159-168

Введение. Информационные технологии в современном мире реализуются комплексом различных научных и инженерных методов и подходов. Наиболее востребованный из них на данном этапе существования общества – это искусственный интеллект, выражающийся в применении его основного прикладного инструмента, называемого компьютерным зрением.

Автоматическое распознавание и обработка изображений, запечатлевших различные объекты в состоянии неподвижности и в движении, составляет основу технического (компьютерного) зрения. Для создания имитационного эффекта аналога человеческого зрения требуется создать условия средствам электронно-вычислительной техники для предоставления возможностей фиксации, обработки и анализа получаемых образов. Полученные данные применяются в разных сферах жизни: экономической, политической, социальной, духовной.

Постановка задачи. Современные наукоемкие технологии искусственного интеллекта не обошли стороной решение вопросов пожаротушения и защиты жизни и здоровья людей. Уже более 15 лет космический и авиационный мониторинг пожарной и экологической безопасности внедрен в деятельность МЧС России и иных государственных структур.

Определение очагов возгорания по термическим точкам является одним из наиболее эффективных способов обнаружения и прогнозирования природных пожаров. Использование возможностей технического зрения получило широкое применение органами управления Единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций, как техногенных, так и возникших по причине капризов стихий природы.

Наиболее удобной технологией с точки зрения фиксации и обработки снимков является видеоаналитика, которая позволяет не только извлекать образы из видеопоследовательностей, но и распознавать и сохранять их в автоматическом режиме в специально заданных параметрах и местах хранения.

Методы исследования. В данной работе авторами продолжен собственный цикл исследований по установлению методов и алгоритмов искусственного интеллекта, способных влиять на качество решений, принимаемых РТП в процессе управления боевыми действиями на месте вызова.

О поведении дыма в очагах возгорания уже было описано ранее [1]. Цветосмещение дымовых потоков, как и их динамика, до сих пор остаются слабо изученными, и, как следствие,

становятся серьезной проблемой РТП в установлении выбора решающего направления и определении безопасных позиций личного состава при проведении мероприятий по тушению пожаров, особенно в сложных условиях и при недостатке информации о горючей нагрузке, размещенной на объекте защиты. Например, своевременный мониторинг участниками пожаротушения больших клубов «вихревых дымовых потоков» у «закрытых» помещений может снизить риск травмирования в результате высвобождения энергии перегретых газов и последующего взрыва.

Для определения угроз, связанных с травмами и гибелью пожарных, вызванных движением газообразных масс с выделением тепла при горении, проведем анализ открытых статистических источников за 15 лет по России [2, 3]. Анализ статистических данных позволил сделать вывод о том, что в категории основных причин нанесения ущерба жизни и здоровью огнеборцев в период выполнения ими действий по тушению очагов возгорания, прослеживаются интоксикация продуктами горения, отравляющими веществами, а также смертельные исходы и ранения, полученные при непосредственной близости к источникам взрыва газов с повышенной концентрацией и без неё (рис.1-4).

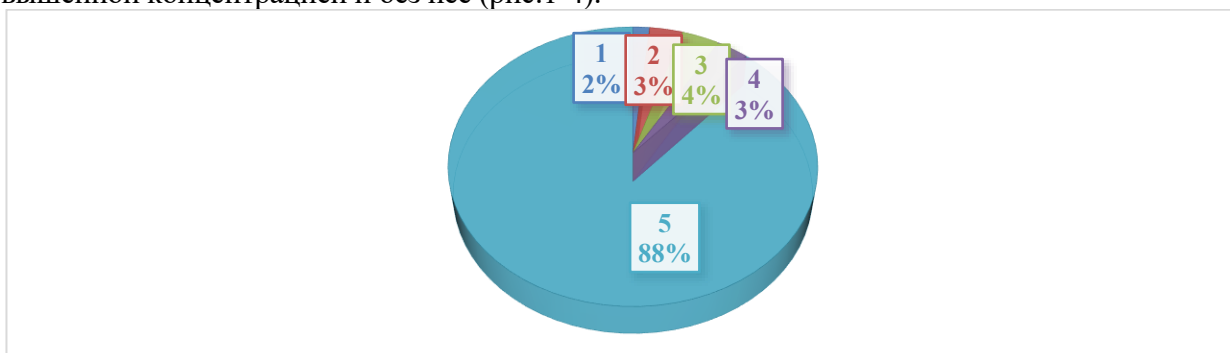


Рис. 1 - Основные причины травмирования личного состава МЧС России при тушении пожаров, связанных с термическим газообменом

1 - отравление вредными веществами, 2 - отравление токсичными термическими продуктами, 3 - взрыв сжатых газов при повышенной концентрации, 4 - пожар-вспышка, обратная тяга, 5 - иные причины

Fig. 1 - The main causes of injuries to personnel of the Russian Emergencies Ministry when extinguishing fires associated with thermal gas exchange

1 - poisoning by harmful substances, 2 - poisoning by toxic thermal products, 3 - explosion of compressed gases at elevated concentrations, 4 - fire-flash, backdraft, 5 - other causes

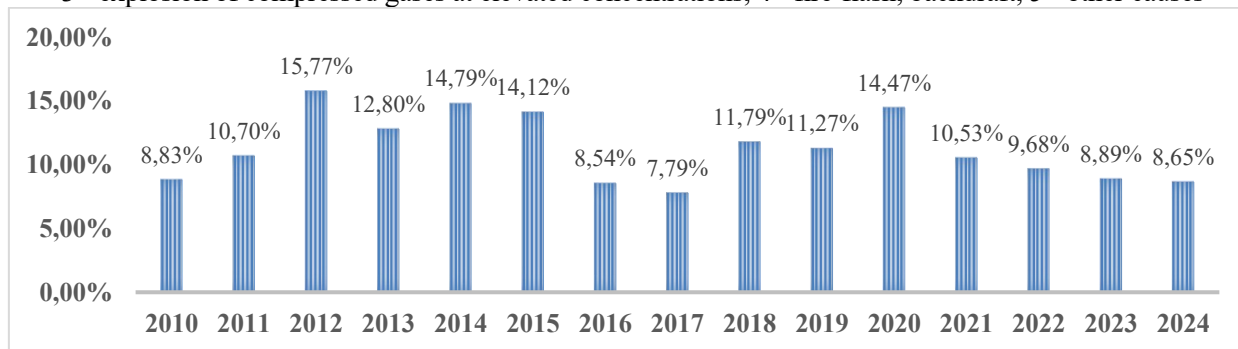


Рис. 2 - Динамика травмирования личного состава МЧС России при тушении пожаров, связанных с термическим газообменом

Fig. 2 - Dynamics of injuries to personnel of the Russian Emergencies Ministry when extinguishing fires associated with thermal gas exchange

Анализ травмирования и, в особенности, гибели должностных лиц реагирующих подразделений пожарной охраны за отчетный период показал, что одними из немаловажных причин, сопутствующих указанным печальным последствиям пожара, остаются процессы, внешними проявлениями которых могут быть дымообразующие потоки и цвет выделяемого дыма.

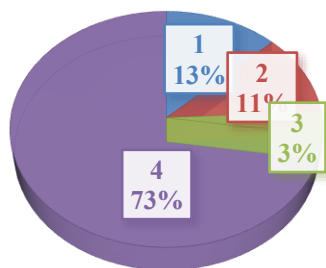


Рис. 3 – Основные причины гибели личного состава МЧС России при тушении пожаров, связанных с термическим газообменом

1 – отравление токсичными термическими продуктами, 2 – взрыв сжатых газов при повышенной концентрации, 3 – пожар-вспышка, обратная тяга, 4 – иные причины

Fig. 3 - The main causes of death of personnel of the Russian Emergencies Ministry when extinguishing fires associated with thermal gas exchange

1 – poisoning by toxic thermal products, 2 – explosion of compressed gases at elevated concentrations, 3 – fire-flash, backdraft, 4 – other causes

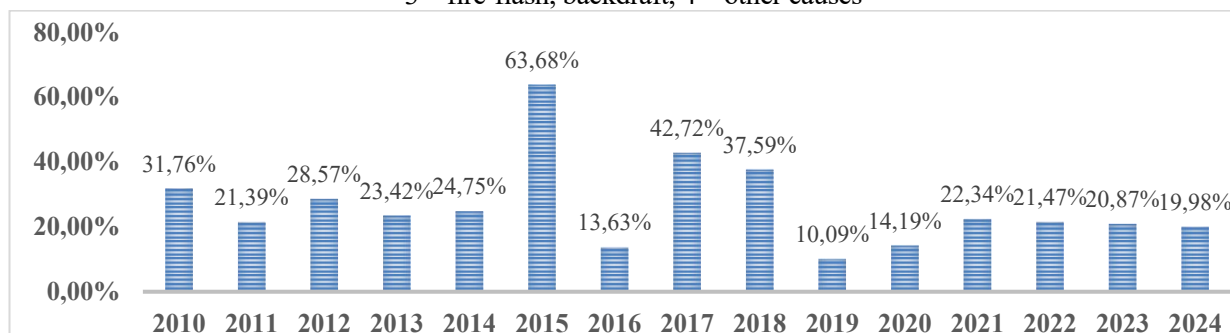


Рис. 4 – Динамика гибели личного состава МЧС России при тушении пожаров, связанных с термическим газообменом

Fig. 4 - Dynamics of deaths of personnel of the Russian Emergencies Ministry during fire extinguishing associated with thermal gas exchange

В целом в нашей стране в последние десятилетия профильными специалистами научных и образовательных учреждений проводилось недостаточное количество экспериментальных исследований об установлении пожарно-технических показателей различных веществ и материалов, участвующих в физико-химических реакциях, протекающих в очаге пожара. Несмотря на повсеместное использование при строительстве и ремонте инновационных полимерных и иных неорганических материалов, созданные Ю.А. Кошмаровым, А.Н. Баратовым и А.Я. Корольченко типовые базы классификации нагрузки по пожаровзрывоопасности и горючести практически не актуализировались и не дополнялись [4-7]. В настоящее время вопросы анализа частиц дыма являются областью научных интересов профессора Пузача С.В. [8, 9]. При этом, если говорить о показателях и свойствах дыма, то исследования осуществлялись и осуществляются исключительно в формате определения дымообразующей способности строительных материалов для оценки возможности их применения на путях эвакуации в рамках сертификации продукции, а также при проведении пожарно-технических экспертиз [10, 11]. Зарубежными учеными указанная область изучалась только в целях производства средств пожарной автоматики [12, 13]. А об особенностях поведения частиц дыма в процессе термического разложения или пиролиза и опасностях, сопровождающихся этими явлениями при подаче огнетушащих веществ и принятии соответствующих мер по недопущению воздействия на спасаемых людей и участников пожаротушения, научно-исследовательская работа проводилась в объеме, несоизмеримо малом в сравнении с потенциальными угрозами, возникающими в результате этих процессов. В целях устранения указанного дефицита знаний авторами принято решение о формировании и систематизации базы данных снимков дыма, образующе-

гося при сгорании различных веществ и материалов (и их комбинации), составляющих основную горючую нагрузку в помещениях объектов разного функционального назначения. Полученные сведения посредством методов машинного обучения позволят использовать данную информацию для создания программно-аппаратных продуктов систем поддержки принятия решений на месте осуществления работ по тушению и спасению пострадавших, а также повышения уровня безопасности специалистов пожарно-спасательной отрасли.

Обсуждение результатов. Для достижения указанной цели первоначально установлен тип горючей нагрузки и классификатор признаков, исследуемых в рамках данного научного изыскания (табл. 1).

Таблица 1. Классификатор (выборка) изображений дыма в зависимости от пожарной нагрузки
Table 1. Classifier (sample) of smoke images depending on fire load

№ п/п Item no.	Тип пожарной нагрузки Fire load type	Вид горючего вещества Type of combustible sub- stance	Агрегатное со- стояние State of matter	Присваиваемый иден- тификационный номер Assigned identification number
1.	Бумага и её производ- ные Paper and its derivatives	Бумага упаковочная	Твердое вещество Solid matter	Б0001
2.		Бумага офсетная		Б0002
3.		Бумага туалетная		Б0003
4.		Глянцевые журналы		Б0004
5.		Книги		Б0005
6.	Древесина и её произ- водные Wood and its derivatives	Доски	Твердое вещество Solid matter	Д0001
7.		Фанера		Д0002
8.		Древесно-стружачая плита		Д0003
9.		Древесно-волоконная плита		Д0004
10.	Кожаные изделия Leather goods	Натуральная кожа	Твердое вещество Solid matter	К0001
11.	Резинотехнические изделия Rubber products	Автомобильные шины	Твердое вещество Solid matter	Р0001
12.		Резиновая обувь и средства защиты		Р0002
13.		Резиновые игрушки		Р0003
14.	Текстиль Textile	Хлопок	Твердое вещество Solid matter	Т0001
15.		Шерсть		Т0002
16.	Пластмассы Plastics	Полиэтилентерефталат	Твердое вещество Solid matter	П0001
17.		Полиэтилен		П0002
18.		Поливинилхлорид		П0003
19.		Полипропилен		П0004
20.		Полистирол		П0005

Созданный банк изображений позволит реализовывать дальнейшие поиски адекватных математических, имитационных и технических инструментов формирования систем поддержки управления деятельности РТП. Предложенный авторами перечень видов горючих веществ и материалов (структура базы данных) не является исчерпывающим списком, а предполагает получение первоначальных обобщенных и усредненных образцов фотоснимков высокого разрешения для последующего проектирования подробного набора данных с более точными и корректными цветовыми показателями. Изучение возможности автоматизации распознавания дымовых частиц в зависимости от конкретного вида вещества или материала, сохра-

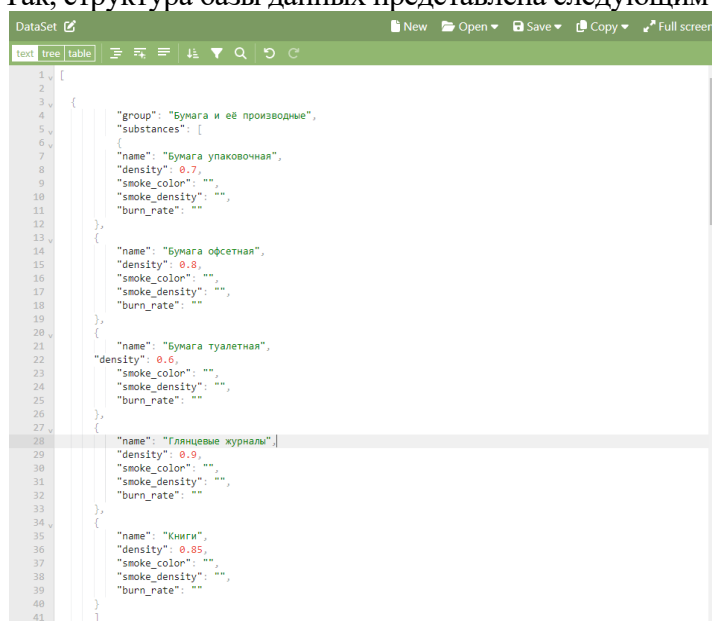
ненных в разработанном датасете, является основной целью научных исследований, заложенных авторами в краткосрочной перспективе. Для улучшения понимания механизмов дымообразования предлагается применение искусственного интеллекта в анализе и систематизации данных о пожарах – в долгосрочной.

Достижению цели должны способствовать следующие первоочередные задачи:

- совершенствование прототипа установки, позволяющей адекватно регистрировать видеопоследовательность кадров с последующей возможностью их декомпозиции на качественные изображения;
- проведение комплекса экспериментальных исследований по всесторонней фиксации цветовых характеристик дымообразования изучаемых продуктов термического разложения;
- совершенствование и разработка алгоритмов автоматизации процессов распознавания вида горючей нагрузки (конкретного вещества или материала), исходя из выявленных параметров дыма в инфракрасном и ультрафиолетовом диапазонах спектров;
- проведение процедур обучения системы методами первичной обработки набора данных;
- выявление и корректировка типовых ошибок и погрешностей;
- пополнение базы данных;
- формирования базы знаний.

По мнению авторов, в целях точного и корректного последующего обучения модели сформированный датасет должен содержать не менее 1000 снимков по каждому виду горючего материала, соответственно общий объем банка данных следует формировать количеством не менее 20000 изображений. Для формирования базы данных, которая будет использоваться для определения типа пожарной нагрузки по дымовому потоку, важно структурировать информацию таким образом, чтобы она была удобна для анализа и обработки.

Приведем пример описания структуры базы данных и ее содержимого, представленных на основе табл. 1. Группа «Бумага и её производные» содержит различные типы горючих веществ. Каждый тип бумаги имеет свои уникальные характеристики, влияющие на свойства образующегося дымового потока. Формирование таких данных для обучения нейронной сети осуществляется с помощью нескольких программных средств и подходов [14, 15]. Для этого создана таблица или JSON-файл, содержащий информацию о каждом виде горящей бумаги (цвет дыма, плотность дыма, интенсивность дымовыделения и т.д.), сохраняющие информацию в CSV или JSON формате. Так, структура базы данных представлена следующим образом (рис. 5):



```
1 [
2   {
3     "group": "Бумага и её производные",
4     "substances": [
5       {
6         "name": "Бумага упаковочная",
7         "density": 0.7,
8         "smoke_color": "",
9         "smoke_density": "",
10        "burn_rate": ""
11      },
12      {
13        "name": "Бумага офсетная",
14        "density": 0.8,
15        "smoke_color": "",
16        "smoke_density": "",
17        "burn_rate": ""
18      },
19      {
20        "name": "Бумага туалетная",
21        "density": 0.6,
22        "smoke_color": "",
23        "smoke_density": "",
24        "burn_rate": ""
25      }
26    ]
27  },
28  {
29    "name": "Глянцевые журналы",
30    "density": 0.9,
31    "smoke_color": "",
32    "smoke_density": "",
33    "burn_rate": ""
34  },
35  {
36    "name": "Книги",
37    "density": 0.85,
38    "smoke_color": "",
39    "smoke_density": "",
40    "burn_rate": ""
41  }
42 ]
```

Рис. 5 - Структура датасета в формате JSON
Fig. 5 - Dataset structure in JSON format

Объединение метаданных с изображениями для обучения нейросети требует тщательной подготовки данных, аннотации и правильного выбора инструментов [16, 17, 18]. С помощью фреймворка PyTorch, был создан прототип модели для распознавания дымовых следов различных видов бумаги, а также других материалов, представленных в табл. 1. Обучение модели осуществлено основе YOLO [19, 20].

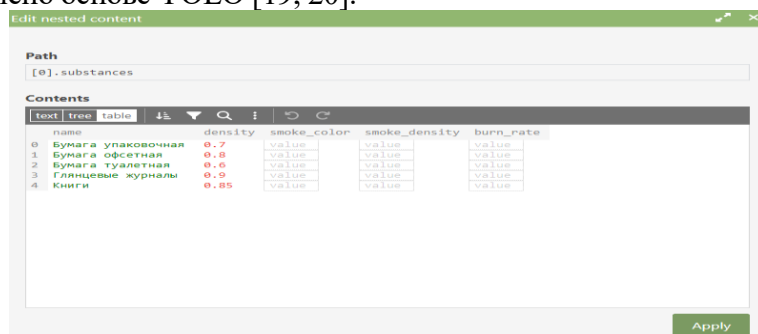


Рис. 6 - Интерфейсное окно для ввода полученных данных в JSON-файл

Fig. 6 - Interface window for entering received data into a JSON file

В целях корректного и эффективного применения полученных данных, разработанный датасет снимков трансформируется в итоговый инструмент системы поддержки принятия решений РТП и оперативного штаба пожаротушения – базу знаний. Алгоритм создания базы знаний предусматривает определенную последовательность действий пользователей: происходит загрузка предварительно подготовленных фотографий в автоматизированную систему, их обработка и сохранение (рис.6).

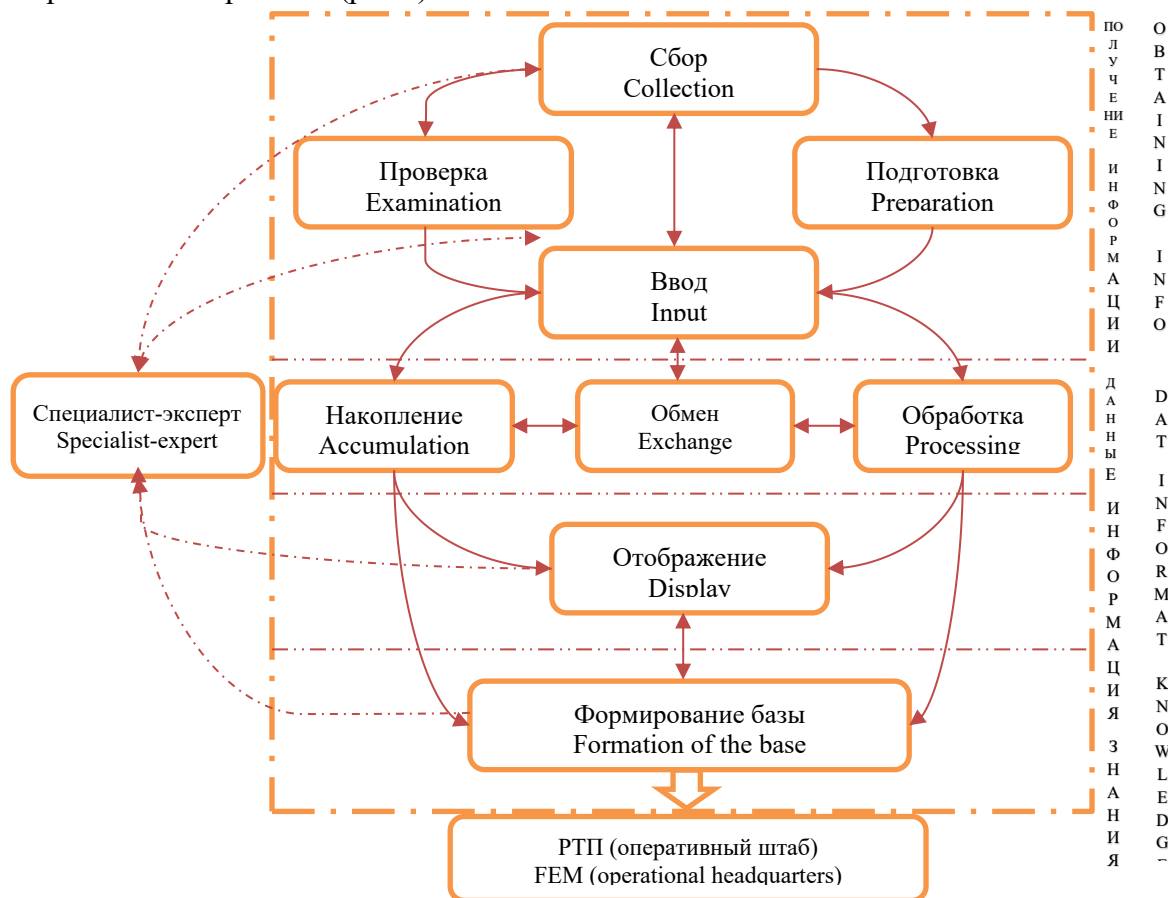


Рис. 7 - Модель формирования базы знаний РТП по анализу дыма в зависимости от типа горючей нагрузки

Fig. 7 - Model for forming the knowledge base of the FEM for smoke analysis depending on the type of combustible load

Затем осуществляется выбор конкретных типов и параметров горючей нагрузки, по которым требуется создание базы знаний. Модель (рис. 7) проектирования базы знаний изображений дыма в зависимости от продукта горения состоит из следующих основных компонентов: работа специалиста по подготовке исходных данных, автоматический анализ входных данных интеллектуальной системой, сохранение обработанной информации в базу данных, формирование базы знаний.

Вывод. Новизна исследования заключается в интеграции искусственного интеллекта с динамикой пожаров для создания адаптивных методов, моделей, алгоритмов поддержки решений при ведении боевых действий.

Проведенный анализ травмирования и гибели пожарных и спасателей подтверждает важность и актуальность предлагаемых авторами исследований. Часто причиной отравления личного состава продуктами горения является несвоевременное включение в средства индивидуальной защиты органов дыхания или вообще их неиспользование вследствие некачественной оценки руководителем тушения пожара зоны возгорания и горящих материалов. Разрабатываемые механизмы анализа дыма будут способствовать снижению уровня опасности личного состава пожарно-спасательных подразделений и повышать их тактические возможности непосредственно в зоне контакта с огнем. Безопасность огнеборцев – это несомненный приоритет в вопросах защиты людей и имущества, что дает авторам стимул к проведению дальнейших научных поисков и решений в данной области.

Библиографический список:

1. О процессах дымообразования на месте пожара / М.В. Шевцов, А.Н. Денисов, М.М. Данилов [и др.] // Гражданская оборона на страже мира и безопасности: Материалы VIII Международной научно-практической конференции, посвященной Всемирному дню гражданской обороны: в 5-ти частях, Москва, 01 марта 2024 года. – Москва: Академия Государственной противопожарной службы, 2024. – С. 369-374. – EDN NXCBQV.
2. Обстоятельства производственного травматизма и гибели личного состава Федеральной противопожарной службы МЧС России (2010-2020 гг) / В.И. Евдокимов, В.С. Путин, А.А. Ветошкин, В.В. Артюхин // Медико-биологические и социально-психологические проблемы безопасности в чрезвычайных ситуациях. – 2021. – № 4. – С. 5-19. – DOI 10.25016/2541-7487-2021-0-4-05-19. – EDN KPNHZI.
3. Анализ гибели (смерти) лиц из числа личного состава МЧС России за 2024 год [электронный ресурс]. URL: <https://fireman.club/literature/analiz-gibeli-smerti-lichnogo-sostava-v-mchs-rossii-za-i-kvartal-2024-goda/> (дата последнего обращения: 23 февраля 2025 г.).
4. Кошмаров Ю.А. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении: Учебное пособие. – М.: Академия ГПС МВД России, 2000. 118 с. ISBN – 59229-0011-0.
5. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения: Справочное издание: в 2-х книгах. Книга 1 / А.Н. Баратов, А.Я. Корольченко, Г.Н. Кравчук и др. - М.: Химия, 1990. - 496 с.
6. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения: Справочное издание: в 2-х книгах. Книга 2 / А.Н. Баратов, А.Я. Корольченко, Г.Н. Кравчук и др. - М.: Химия, 1990. - 384 с.
7. А.Я. Корольченко, Д.А. Корольченко. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения. Справочник: в 2-х ч. – 2-е изд. перераб.и доп. – М.: Асс. «Пожнаука», 2004. – Ч. I. – 713 с. ISBN – 5-901283-02-3.
8. Экспериментальная оценка объёмной концентрации и размеров твёрдых частиц дыма, образующихся при терморазложении горючих материалов / С.В. Пузач, Ю.Ю. Журавлев, О.Б. Болдрушкиев, Р.Г. Акперов // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2024. – № 2. – С. 5-12. – DOI 10.25257/FE.2024.2.5-12. – EDN HBFAXS.
9. Пузач, С.В. Численное моделирование задымления помещений при пожаре с учетом различных типов пожарной нагрузки / С.В. Пузач, С.П. Калмыков // Пожаровзрывобезопасность. – 2024. – Т. 33, № 2. – С. 42-49. – DOI 10.22227/0869-7493.2024.33.02.42-49. – EDN NNKXIS.
10. Григорьева, М.П. Исследование дымообразующей способности напольных покрытий / М.П. Григорьева, Т.Ю. Еремина, Н.И. Константинова // Промышленное и гражданское строительство. – 2016. – № 3. – С. 25-30. – EDN VSEOCR.
11. Оценка пожарной опасности напольных покрытий при производстве пожарно-технической экспертизы / Г.В. Плотникова, А.И. Волкова, В.Ю. Селезнев, А.С. Ковалько // Вестник Восточно-Сибирского института МВД России. – 2013. – № 3(66). – С. 76-83. – EDN SIQSAT.

12. K. Muhammad, S. Khan, M. Elhoseny, S.H. Ahmed, and S.W. Baik, "Efficient fire detection for uncertain surveillance environment," IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019.
13. D. Luan, T. Chu, Jakub Bielawski, C. Fan, W. Węgrzyński, X. Huang (2024) Smoke movement and stratification of tunnel fires under coupled effects of rainfall and ventilation, Fire Safety Journal, 104322. DOI: 10.1016/j.firesaf.2024.104323.
14. 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. – EDN IZBILN.
15. Raschka, S. Machine learning in python: Main developments and technology trends in data science, machine learning, and artificial intelligence / S. Raschka, J. Patterson, C. Nolet // Information (Switzerland). – 2020. – Vol. 11, No. 4. – P. 193. – DOI 10.3390/info11040193. – EDN TEBRGY.
16. Эшанкулова, С. Жахон кутубхоналарида сунъий интеллектдан фойдаланиш истикболлари / С. Эшанкулова // INFOLIB: информационно-библиотечный вестник. – 2023. – No. 3. – P. 41-45. – DOI 10.34920/2181-8207/2023/3-075. – EDN FPFQJQ.
17. Тыринов, В.С. Разработка и обучение нейросети распознаванию изображений на базе языка Python и библиотеки TensorFlow / В.С. Тыринов // Студенческая наука и XXI век. – 2023. – Т. 20, № 1-1(23). – С. 108-110. – EDN XUPZXM.
18. Inoue T., Chaudhury S., De Magistris G., Dasgupta S. Transfer learning from synthetic to real images using variational autoencoders for precise position detection. Intern. Conf. on Image Processing (ICIP), Athens, 2018, pp. 2725–2729. doi:10.1109/ICIP.2018. 8451064.
19. PyTorch documentation [электронный ресурс]. URL: <https://pytorch.org/docs/stable> (дата последнего обращения: 06 февраля 2025 г.).
20. Константинов, А.А. Использование YOLO для обнаружения объектов в видеозаписи на языке Python с помощью библиотеки OpenCV / А.А. Константинов // Modern Science. – 2019. – № 6-1. – С. 191-198. – EDN GDYGHW.

References:

1. On the processes of smoke formation at the site of a fire / M. V. Shevtsov, A. N. Denisov, M. M. Danilov [et al.] // Civil defense on guard of peace and security: Proceedings of the VIII International scientific and practical conference dedicated to the World Civil Defense Day: in 5 parts, Moscow, March 01, 2024. - Moscow: Academy of the State Fire Service, 2024; 369-374. - EDN NXCBOV. (In Russ)
2. Circumstances of industrial injuries and deaths of personnel of the Federal Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia (2010-2020) / V. I. Evdokimov, V. S. Putin, A. A. Vetoshkin, V. V. Artyukhin. *Medical, biological and socio-psychological problems of safety in emergency situations*. 2021;4:5-19. – DOI 10.25016/2541-7487-2021-0-4-05-19. – EDN KPNHZI. (In Russ)
3. Analysis of the fatalities (deaths) of persons from among the personnel of the Ministry of Emergency Situations of Russia for 2024 [electronic resource]. URL: <https://fireman.club/literature/analiz-gibeli-smerti-lichnogo-sostava-v-mchs-rossii-za-i-kvartal-2024-goda/> (date of last access: February 23, 2025). (In Russ)
4. Koshmarov Yu.A. Forecasting hazardous factors of fire in a room: Study guide. – M.: Academy of the GPS of the Ministry of Internal Affairs of Russia, 2000:118 p. ISBN – 59229-0011-0. (In Russ)
5. Fire and explosion hazard of substances and materials and their extinguishing means: Reference publication: in 2 books. Book 1. A.N. Baratov, A.Ya. Korolchenko, G. N. Kravchuk et al. Moscow: Chemistry, 1990;496 p. (In Russ)
6. Fire and explosion hazard of substances and materials and their extinguishing means: Reference publication: in 2 books. Book 2. A.N. Baratov, A.Ya. Korolchenko, G.N. Kravchuk et al. Moscow: Chemistry, 1990. 384 p. (In Russ)
7. A.Ya. Korolchenko, D.A. Korolchenko. Fire and explosion hazard of substances and materials and their extinguishing means. Handbook: in 2 parts. – 2nd ed. revised and enlarged. – M.: Assoc. "Pozhnauka", 2004; Part I.:713 ISBN – 5-901283-02-3. (In Russ)
8. Experimental assessment of the volume concentration and size of solid smoke particles formed during thermal decomposition of combustible materials. S.V. Puzach, Yu.Yu. Zhuravlev, O.B. Boldrushkiev, R.G. Akperov. *Fires and emergencies: prevention, liquidation*. 2024; 2: 5-12. – DOI 10.25257/FE.2024.2.5-12. – EDN HBFKKS. (In Russ)
9. Puzach, S.V. Numerical modeling of smoke in premises during a fire, taking into account various types of fire load / S.V. Puzach, S.P. Kalmykov. *Fire and explosion safety*. 2024;33(2):42-49. - DOI 10.22227/0869-7493.2024.33.02.42-49. - EDN NNKXIS. (In Russ)
10. Grigorieva, M.P. Study of smoke-forming capacity of floor coverings / M.P. Grigorieva, T.Yu. Eremina, N.I. Konstantinova. *Industrial and civil engineering*. - 2016. - No. 3. - Pp. 25-30. - EDN VSEOCP. (In Russ)

11. Assessment of fire hazard of floor coverings during fire-technical examination / G.V. Plotnikova, A.I. Volkova, V.Yu. Seleznev, A.S. Kovalko // Bulletin of the East Siberian Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia. - 2013. - No. 3 (66). - P. 76-83. - EDN SIQSAT.
12. K. Muhammad, S. Khan, M. Elhoseny, S.H. Ahmed, and S.W. Baik, "Efficient fire detection for uncertain surveillance environment," IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019.
13. D. Luan, T. Chu, Jakub Bielawski, C. Fan, W. Węgrzyński, X. Huang (2024) Smoke movement and stratification of tunnel fires under coupled effects of rainfall and ventilation, Fire Safety Journal, 104322. DOI: 10.1016/j.firesaf.2024.104323.
14. Bagayev, I.I. Analysis of the concepts of neural network and convolutional neural network, training of convolutional neural network using the TensorFlow module. *Mathematical and software support of systems in the industrial and social spheres*. 2020; 8(1):15-22. – DOI 10.18503/2306-2053-2020-8-1-15-22. – EDN IZBILN. (In Russ)
15. Raschka, S. Machine learning in python: Main developments and technology trends in data science, machine learning, and artificial intelligence / S. Raschka, J. Patterson, C. Nolet. *Information (Switzerland)*. 2020;11(4):193. – DOI 10.3390/info11040193. – EDN TEBRGY.
16. Eshankulova, S. Development of neural networks for image recognition. *INFOLIB: information and library bulletin*. 2023;3: 41-45. - DOI 10.34920/2181-8207/2023/3-075. - EDN FPFQJQ. (In Russ)
17. Tyrinov, V.S. Development and training of a neural network for image recognition based on the Python language and the TensorFlow library. *Student science and the XXI century*. 2023; 20(1):108-110. - EDN XUPZXM. (In Russ)
18. Inoue T., Chaudhury S., De Magistris G., Dasgupta S. Transfer learning from synthetic to real images using variational autoencoders for precise position detection. Intern. Conf. on Image Processing (ICIP), Athens, 2018; 2725–2729. doi:10.1109/ICIP.2018. 8451064.
19. PyTorch documentation [electronic resource]. URL: <https://pytorch.org/docs/stable> (last accessed: February 06, 2025).
20. Konstantinov, A.A. Using YOLO for Object Detection in Video in Python Using the OpenCV Library / A.A. Konstantinov. *Modern Science*. 2019;6-1:191-198. - EDN GDYGHW. (In Russ)

Сведения об авторах:

Максим Викторович Шевцов, кандидат технических наук, начальник учебно-методического центра Академии ГПС МЧС России; shevtsovmv@mail.ru

Алексей Николаевич Денисов, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры пожарной тактики и службы (в составе учебно-научного комплекса пожаротушения) Академии ГПС МЧС России; dan_aleks@mail.ru

Мирослав Викторович Иванов, инспектор учебного отдела учебно-методического центра Академии ГПС МЧС России; miroslav.ivanov2001@inbox.ru

Александр Александрович Козлов, начальник отдела организации предоставления государственных услуг и межведомственного взаимодействия Департамента надзорной деятельности и профилактической работы МЧС России; dkac77@gmail.com

Information about authors:

Maxim V. Shevtsov, Cand. Sci. (Eng)., Head of the educational and methodological center of the Academy of the State fire service of the Ministry of emergency situations of Russia; shevtsovmv@mail.ru

Aleksey N. Denisov, Dr. Sci. (Eng)., Prof., Prof., Department of fire tactics and service (as part of the educational and scientific complex of fire extinguishing) of the Academy of the State fire service of the Ministry of emergency situations of Russia; dan_aleks@mail.ru

Miroslav V. Ivanov, Inspector of the educational Department of the educational and methodological center of the Academy of the State fire service of the Ministry of emergency situations of Russia; miroslav.ivanov2001@inbox.ru

Aleksander A. Kozlov, Head of the Department for the organization of the provision of public services and interdepartmental cooperation of the Department of supervisory activities and preventive work of the Ministry of emergency situations of Russia; dkac77@gmail.com

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/ Received 02.03.2025.

Одобрена после рецензирования/ Reviced 30.04.2025.

Принята в печать/ Accepted for publication 19.05.2025.

Математическая модель количественной оценки защищенности открытых операционных систем при их выборе в АС ОВД

А.И. Янгиров¹, Е.А. Рогозин², П.М. Дуплякин², Т.В. Мещерякова², А.О. Ефимов²

¹ ФКУ «НИЦ «Охрана» Росгвардии,

¹ 111539, г. Москва, Реутовская, 12Б, Россия,

² Воронежский институт МВД России,

² 394065, г. Воронеж, проспект Патриотов, 53, Россия

Резюме. Цель. В статье представлена математическая модель количественной оценки защищенности открытых операционных систем (Далее – ОС) автоматизированных систем органов внутренних дел Российской Федерации (Далее – АС ОВД РФ), разработанная на основе требований стандарта ГОСТ Р ИСО/МЭК 15408. **Метод.** Исследование проведено на основе аналитических методов: анализа возможных угроз безопасности открытых ОС и требований стандартов ГОСТ Р ИСО/МЭК 15408, анализа иерархий и применения положений нечеткой логики. **Результат.** Результатом расчета показателя защищенности анализируемой ОС является лингвистический показатель степени защищенности ОС и показатель защищенности ОС, выраженный в процентном виде. **Вывод.** Авторами предложена математическая модель количественной оценки защищенности открытых ОС при их выборе в АС ОВД РФ.

Ключевые слова: оценка защищенности, требования безопасности, банк данных угроз безопасности информации, показатель защищенности, критерии защищенности, операционная система, математическая модель

Для цитирования: А.И. Янгиров, Е.А. Рогозин, П.М. Дуплякин, Т.В. Мещерякова, А.О. Ефимов. Математическая модель количественной оценки защищенности открытых операционных систем при их выборе в АС ОВД. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025; 52(2):169-179. DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-2-169-179

Mathematical model for quantitative assessment of the Security of open operating systems when selecting in the AS of the Internal Affairs Bodies

A.I. Yangirov¹, E.A. Rogozin², P.M. Duplyakin², T.V. Meshcheryakova², A.O. Efimov²

¹ FSI «SRC «OKHRANA» of the Federal Service of National Guard of Russia,

¹ 12 B Reutovskaya St., Moscow 111539, Russia,

² Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia,

² 53 Patriotov Ave., Voronezh 394065, Russia

Abstract. Objective. The article considers a mathematical model for quantitative assessment of the security of open operating systems (hereinafter referred to as OS) of automated systems of the internal affairs bodies of the Russian Federation (hereinafter referred to as AS OVD RF), developed based on the requirements of the standard GOST R ISO/IEC 15408. **Method.** The study was conducted based on the methods: analysis of possible threats to the security of open operating systems and the requirements of the standard GOST R ISO / IEC 15408, analysis of hierarchies and applications of fuzzy logic provisions. **Result.** The result of calculating the security indicator of the analyzed OS is a linguistic indicator of the degree of OS security and an OS security indicator expressed as a percentage. **Conclusion.** The authors propose a mathematical model for assessing the security of open operating systems when choosing them in the AS OVD RF.

Keywords: security assessment, security requirements, database of information security threats, security indicator, security criteria, operating system, mathematical model

For citation: A.I. Yangirov, E.A. Rogozin, P.M. Duplyakin, T.V. Meshcheryakova, A.O. Efimov. Mathematical model for quantitative assessment of the Security of open operating systems when selecting in the AS of the Internal Affairs Bodies. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2025; 52(2):169-179. (In Russ) DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-2-169-179.

Введение. Современная цифровая эпоха характеризуется стремительным технологическим прогрессом, который сопровождается параллельным развитием киберпреступности. Государственные структуры исполнительной власти и органы внутренних дел являются особенно уязвимыми к кибератакам.

Это обусловлено рядом факторов. Данные ведомства аккумулируют и обрабатывают огромные массивы конфиденциальной информации, представляющей высокую ценность для злоумышленников. Хищение или модификация таких данных может нанести серьезный ущерб национальной безопасности и правоохранительной деятельности.

Информационные системы государственного сектора обычно имеют более сложную и разветвленную архитектуру по сравнению с корпоративными сетями. Это значительно усложняет их защиту и создает дополнительные «точки входа» для кибератак. Наконец, высокая публичность и социальная значимость государственных органов делают их привлекательными мишенями для хакеров-активистов и других деструктивно настроенных субъектов. Успешные кибератаки на такие структуры способны вызвать широкий общественный резонанс и нанести ущерб их авторитету.

В настоящее время злоумышленники демонстрируют высокую изобретательность, постоянно совершенствуя арсенал методов и средств для взлома программно-аппаратных комплексов и получения доступа к конфиденциальным данным. Эта динамика создает существенные вызовы для специалистов в области информационной безопасности, вынуждая их уделять повышенное внимание вопросам защиты вычислительных ресурсов и критически важной информации.

Таким образом, комплексный характер стоящих перед государственными организациями задач, сложность их информационной инфраструктуры и повышенное внимание к ним со стороны злоумышленников обуславливают их уязвимость к кибератакам.

Постановка задачи. Обеспечение надежной защиты становится неотъемлемым атрибутом современной информационной инфраструктуры, требуя активизации фундаментальных и прикладных исследований, направленных на противодействие передовым методам взлома и достижение цифрового суверенитета. В этих условиях обеспечение информационной безопасности ОС АС ОВД становится одной из значимых задач, особую актуальность приобретают исследования, направленные на защиту информационных систем от несанкционированного доступа. Особо атакам злоумышленников подвержены ОС АС ОВД, не предназначенные для обработки сведений, составляющих государственную тайну (Далее – открытые ОС). Такие системы зачастую функционируют в менее защищенном информационном пространстве, будучи ориентированными на решение широкого спектра прикладных задач, такие ОС обычно не обладают повышенными мерами защиты. Это делает их одной из приоритетных мишеней для устремлений киберпреступников, стремящихся получить доступ к критически важным данным и ресурсам.

В данных обстоятельствах разработка и внедрение действенных механизмов кибербезопасности открытых ОС АС ОВД, не связанных с обработкой сведений, составляющих государственную тайну, приобретает особую актуальность. Комплексный подход к обеспечению их защищенности требует интеграции передовых технологических решений, организационно-правовых мер, а также непрерывного мониторинга и реагирования на возникающие угрозы. В области защиты информационных систем от несанкционированного

доступа специалисты по безопасности применяют множество разнообразных методов, технологий и концепций. Однако для целостной оценки и принятия правильных решений по обеспечению безопасности открытых ОС необходимы обобщающие критерии, которые позволяют комплексно оценить уровень их защищенности.

В настоящее время существует большое количество частных критериев безопасности, ориентированных на отдельные аспекты ОС, например, криптостойкость алгоритмов или скорость реагирования на атаки. Но при проектировании защищенных ОС особенно важны критерии, отражающие общую защищенность системы. Такие комплексные критерии являются ключевым элементом при разработке и выборе средств защиты для АС. Они позволяют объективно оценить, насколько эффективно ОС сможет противостоять потенциальным угрозам.

Методы исследования. В Российской Федерации действует стандарт ГОСТ Р ИСО/МЭК 15408 «Методы и средства обеспечения безопасности. Критерии оценки безопасности информационных технологий», представленный в трёх частях [1,2,3]. Данные стандарты определяют систему критериев для оценки безопасности информационных технологий. При определении требований к безопасности конкретного объекта отправной точкой служит анализ его назначения и условий применения. На основе этого анализа формулируются цели безопасности, которые затем детализируются в профиле защиты или задании по безопасности. Сами требования стандарта структурированы по иерархическому принципу – от общих классов к конкретным семействам и компонентам. Каждый класс объединяет несколько семейств, а семейства, в свою очередь, содержат один или несколько отдельных компонентов.

Требования и критерии, закрепленные в данном стандарте, а также в соответствующих профилях защиты и заданиях по безопасности, могут быть использованы в качестве базиса для разработки системы показателей, применимой для оценки защищенности открытых ОС АС ОВД. Учитывая комплексный характер требований и критериев, представленных в стандарте, для практического применения наиболее целесообразным представляется их рассмотрение в рамках количественной оценки.

Количественный показатель защищенности позволит проводить оценку ОС в динамике, отслеживая их состояние в течение определенного периода времени, контролировать соблюдение требований безопасности на этапе разработки защищенных ОС, а также поспособствует оптимальному выбору ОС АС ОВД. Исследование проведено на основе аналитических методов: анализа возможных угроз безопасности открытых ОС и требований стандартов ГОСТ Р ИСО/МЭК 15408, анализа иерархий и применения положений нечеткой логики.

Обсуждение результатов. В ранее опубликованных статьях [4,5] рассматривалась общая концепция количественной оценки на основе анализа требований ГОСТ Р ИСО/МЭК 15408 (Далее – Подход) и её реализация в рамках программного обеспечения. В настоящей статье представлена математическая модель, а также отражены отдельные аспекты рассмотренного Подхода. Дальнейшим развитием представленного исследования является разработка Метода количественной оценки защищенности открытых ОС при их выборе в АС ОВД в рамках диссертационной работы, составными частями которого являются перечни угроз и критериев оценки, разработанных на основе стандартов ГОСТ Р ИСО/МЭК 15408, алгоритмы, а также математическая модель. В рассмотренном Подходе количественная оценка ОС АС ОВД производится в три этапа:

- 1 этап – ранжирование и выборка угроз;
- 2 этап – проверка соответствия требований безопасности эталонному профилю защиты, разработанного в соответствии с ГОСТ Р ИСО/МЭК 15408;
- 3 этап – расчет показателя защищенности анализируемой ОС.

Первый этап связан с категоризированием и выборкой угроз. Характер и многообразие угроз, а также возможных факторов и последствий от их реализации затрудняют создание

единой и универсальной методологии для количественной оценки потенциального ущерба. Более того, спектр актуальных угроз постоянно расширяется в связи с технологическим прогрессом, появлением новых способов несанкционированного доступа и использованием инновационных решений, таких как искусственные нейронные сети. Учитывая внутренние нормативные требования ОВД к работе с защищенными ОС, при разработке методического подхода к количественной оценке защищенности открытых ОС целесообразно ориентироваться на существующие базы данных угроз, в которых учтены специфические требования безопасности для защищенных систем. В частности, актуальным в данном контексте является банк данных угроз безопасности информации, разработанный ФАУ «ГНИИИ ПТЗИ ФСТЭК России» [6]. Однако следует учитывать, что не все включенные в него угрозы в равной степени применимы к конкретным АС. Таким образом, при практическом использовании требуется индивидуальный выбор релевантных угроз для каждой отдельной ОС.

В указанной базе данных при реализации каждой угрозы фиксируются следующие типы возможных последствий: «нарушение конфиденциальности», «нарушение целостности» и «нарушение доступности». Характер проявления этих последствий зависит от типа реализованной угрозы. Совокупность всех учитываемых угроз в разработанном Подходе представляется множеством T . В рамках Подхода оценка опасности угрозы для ОС основывается на ее потенциальных последствиях. В зависимости от степени угрозы, можно выделить от одного до трех возможных исходов.

Это позволяет классифицировать угрозы в соответствии с количеством их возможных последствий. При анализе угроз безопасности можно выделить несколько категорий, базирующихся на количестве последствий реализации угрозы:

- 1) T_1 – угрозы, имеющие 1 возможное последствие;
- 2) T_2 – угрозы, имеющие 2 возможных последствия;
- 3) T_3 – угрозы, имеющие 3 возможных последствия.

Общее количество угроз nT , влияющих на оцениваемую ОС АС ОВД, в зависимости от количества последствий может быть представлена следующей формулой:

$$nT = \sum_{i=1}^3 nT_i$$
$$nT = nT_1 + nT_2 + nT_3$$

где: nT_1 – общее количество угроз с 1 последствием;
 nT_2 – общее количество угроз с 2 последствиями;
 nT_3 – общее количество угроз с 3 последствиями.

Важно понимать, что при реализации угрозы, ее фактические последствия могут не проявиться в полной мере. Это связано с влиянием различных факторов, таких как корректность настройки системы, возникающие в процессе эксплуатации ошибки, специфические характеристики самой угрозы, актуальность используемых средств защиты и другие аспекты. Данное обстоятельство было учтено при разработке Подхода.

В рамках первого этапа Подхода предполагается, что специалист, проводящий анализ, формирует перечень возможных угроз для конкретной рассматриваемой ОС. После выборки осуществляется распределение их по степени потенциальной опасности.

На втором этапе проводится проверка соответствия реализованных в оцениваемой ОС (или ее профиле защиты) политик безопасности, целей безопасности, функциональных требований и требований доверия анализируемой ОС эталонному профилю защиты.

В статье [7] определено 6 классов защищенности профилей защиты ОС. ОС, соответствующие 1, 2 и 3 классам защиты, применяются в информационных (автоматизированных) системах, в которых обрабатывается информация, содержащая сведения, составляющие государственную тайну, ОС, соответствующие 4, 5 и 6 классам защиты, не предназначены для обработки таких сведений. Кроме того, профили защиты 4, 5, 6 классов находятся в открытом доступе и представлены на сайте ФАУ «ГНИИИ ПТЗИ ФСТЭК России».

Помимо классификации по защищенности [7] также подразделяет ОС на 3 основных типа: тип «А», тип «Б» и тип «В». Данная типология дополняет деление ОС по классам защиты, обеспечивая более детальную характеристику ОС. В целях проведения количественной оценки защищенности ОС, используемых в АС ОВД, целесообразно применять профили защиты общего назначения (тип «А»). Такие ОС ориентированы на решение обширного количества задач и имеют расширенный функционал, что делает их более универсальными и применимыми в практике ОВД в сравнении с узкопрофильными ОС типов «Б» и «В».

С учетом отмеченного в качестве эталонного профиля защиты выбран профиль ИТ.ОС.А4.ПЗ, как наиболее защищенный вариант, применяемый для открытых ОС, и имеющий высокую практическую значимость для ОВД. Согласно рассматриваемому эталонному профилю защиты к объекту оценки предъявляются следующие требования:

- требования политик безопасности (множество P);
- требования предположений безопасности (множество SA);
- требования целей безопасности (множество O);
- требования целей безопасности для среды функционирования (множество OE);
- компоненты функциональных требований безопасности (множество F);
- компоненты требований доверия к безопасности (множество R).

В рамках Подхода множество S_{pr} включает в себя вышеуказанные множества и может быть представлена в виде:

$$S_{pr} \ni P \cup SA \cup O \cup OE \cup F \cup R$$

Анализ сложных взаимосвязей и зависимостей между представленными множествами требований, их классами, семействами и компонентами указывает на целесообразность применения метода анализа иерархий для количественной оценки таких сложно-структурированных систем. Ранее данный метод уже использовался в исследованиях для количественной оценки информационной безопасности и защищенности АС [8,9,10].

На основании представленных исследований формула для расчета количественного показателя защищенности ОС Q приобретает вид:

$$Q = \frac{G(S_{pr}, T_{\Pi})}{G(S_{pr}, T_M)}$$

где: T_{Π} – количество реализованных требований в оцениваемой ОС;
 T_M – количество требований в эталонной ОС.

При этом количество требований в эталонной системе T_M будет всегда соответствовать общему количеству требований в множестве S_{pr} .

Количество реализованных или предъявляемых требований для множества S_{pr} приобретает вид:

$$G(S_{pr}, T) = \sum_{P_i \in P} G_i(T_P) + \sum_{SA_i \in SA} G_i(T_{SA}) + \sum_{O_i \in O} G_i(T_O) + \\ + \sum_{OE_i \in OE} G_i(T_{OE}) + \sum_{F_i \in F} G_i(T_F) + \sum_{R_i \in R} G_i(T_R)$$

где: $P_i, SA_i, O_i, OE_i, F_i, R_i$ – отдельно выбранные требования, относящиеся к множествам P, SA, O, OE, F, R ;

$G_i(T_P), G_i(T_{SA}), G_i(T_O), G_i(T_{OE}), G_i(T_F), G_i(T_R)$ – степени выполнения отдельно выбранных требований.

Стоит отметить, что в эталонной системе степень выполнения требований $G_i(T_X)$ будет принимать всегда максимальное значение, равное 1.

При этом, степени выполнения требований политик безопасности, предположений безопасности, целей безопасности, целей безопасности для среды функционирования рассчитываются по упрощенной формуле, так как их направления компетенций не имеют иерархических разветвлений:

$$G_i(T_P), G_i(T_{SA}), G_i(T_O), G_i(T_{OE}) = \frac{1}{J_i} \sum_{j=1}^{J_i} C_{ij}(T_{\Pi})$$

Стандарты ГОСТ Р ИСО/МЭК 15408 вводят четкую иерархию и условия работы различных компонентов, что, в свою очередь, влияет на их весовые коэффициенты. В рамках Подхода коэффициенты распределяются равномерно, с учетом количества требований, предъявляемых к каждому компоненту. Согласно ГОСТ Р ИСО/МЭК 15408, компоненты внутри семейств функциональных требований и требований доверия имеют иерархическую зависимость. Примеры зависимостей в соответствии со стандартами представлены на рис. 1.



Рис. 1 – Примеры иерархических зависимостей компонентов

Fig. 1 – Examples of hierarchical dependency components

На рис. 1а представлена последовательная структура, где компонент с большим номером предъявляет более строгие требования, чем компонент с меньшим номером. Некоторые функциональные требования могут иметь более сложную структуру (рис. 1б).

При расчете степеней выполнения требований функциональных компонентов безопасности и компонентов доверия безопасности необходимо учесть сложные зависимости, предусмотренные ГОСТ Р ИСО/МЭК 15408. Таким образом формула для расчета $G_i(T_F)$, $G_i(T_R)$ приобретает вид:

$$G_i(T_F), G_i(T_R) = \frac{1}{J_i} \sum_{j=1}^{J_i} U_{ij}(T_{\Pi}) C_{ij}(T_{\Pi})$$

$U_{ij}(T_{\Pi})$ – соответствует степени реализации требований j -го уровня. Если для данного направления компетентности нет иерархических разветвлений (зависимостей), то $U_{ij}(T_{\Pi})$ принимает значение либо 0 (требования соответствующего компонента не реализованы), либо 1. Если же есть разветвления (зависимости), то $U_{ij}(T_{\Pi})$ принимает значение относительного количества компонентов j -го уровня, требования которых выполнены. Например, $U_{i2}(T_{\Pi})$ принимает значение 1, если реализованы компоненты FAU_SAA.2 и FAU_SAA.3 и принимает значение 0,5, если реализован только один из этих компонентов (естественно при условии, что направлением компетентности является всё семейство требований FAU_SAA). При этом на третьем уровне иерархии в данном примере кроме компонента FAU_SAA.4 необходимо будет рассматривать и компонент FAU_SAA.2. Функция $C_{ij}(T_{\Pi})$ определяет коэффициент значимости используемых параметров в отдельных элементах требований.

Это значение аналогичным образом определяется как взвешенная сумма отдельных коэффициентов, характеризующих влияние тех или иных параметров. Учитываются параметры, входящие только в реализованные требования данного уровня, данного направления компетентности. Для оценки защищенности ОС, работы со сложными структурами и критериями оценки существенное значение имеет применение не только строгих технических методов, но и более гибких, ориентированных на человеческое восприятие способов с использованием удобных лингвистических формулировок. Одним из перспективных исследований в данной области является применение нечеткой логики, разработанной Лотфи Аскером Заде. Данный математический аппарат позволяет анализировать и моделировать

сложные, плохо структурируемые явления и процессы, присутствующие, в том числе, и в области обеспечения информационной безопасности. Нечеткая логика позволяет учитывать не только конкретные технические параметры, но и наличие случайных факторов и неопределенностей. Математическая модель, основанная на нечеткой логике, может достаточно точно отражать сущность моделируемых процессов, при этом адекватно работая в условиях неполноты и субъективности исходных данных. Подробное описание принципов нечеткой логики применимо к Подходу представлено в работе [11].

Многими источниками отмечается необходимость начинать обеспечение защиты от киберугроз с выявления и нейтрализации тех угроз, которые несут наиболее серьезные последствия. Например, в сборнике передового опыта [12], подготовленного Контртеррористическим управлением Организации Объединенных Наций (КТУ ООН) и Исполнительным директором Контртеррористического комитета Совета Безопасности Организации Объединенных Наций (ИДКТК) под председательством Интерпола в 2018 году, рассматривается мировой опыт противодействия террористическим угрозам (в том числе киберугрозам), акцентируется внимание на необходимости первоочередной концентрации усилий организаций на защите от наиболее критических угроз для достижения требуемого уровня защищенности от террористических угроз. Кроме того, согласно пункту 14.1 Правил категорирования объектов критической информационной инфраструктуры Российской Федерации при разработке модели нарушителей и угроз в приоритете следует рассматривать наихудшие сценарии, учитывающие проведение целенаправленных компьютерных атак на объекты критической информационной инфраструктуры, с максимальными негативными последствиями [13].

Пунктом А.7.3.3 ГОСТ Р ИСО/МЭК 15408 определено, что противостояние угрозе не обязательно означает устранение угрозы, а может означать достаточное уменьшение этой угрозы или достаточное смягчение последствий реализации этой угрозы [1]. В рамках Подхода для обозначения устранения угрозы, уменьшения угрозы или смягчения последствий реализации угрозы применяется термин нивелирование угрозы.

Для функционирования нечеткой логики устанавливаются специальные правила. Правила, предусмотренные Подходом, разработаны в соответствии с ранее рассмотренным категорированием угроз в рамках 1 этапа. Правила функционирования нечеткой логики представлены на рис. 2.

Правила (условия) функционирования нечеткой логики метода количественной оценки защищенности открытых операционных систем при их выборе в АС ОВД		
Условие 1 Поскольку семейства функциональных требований, требований доверия и других критериев сложно классифицировать по уровню защиты от конкретных последствий, предполагается, что они нивелируются равномерно (отсутствие определенного требования не позволяет однозначно сказать, в каком виде выразится уязвимость ОС, так как зависимости требований могут быть многогранны)		
Условие 2 При реализации всех требований защиты эталонного профиля защиты система будет иметь максимальную защищенность		
Условие 3 Если будут нивелированы угрозы, которые имеют наибольшее количество последствий, систему можно считать однозначно минимально защищенной (множество угроз T_3)	Условие 4 Если будут нивелированы угрозы, которые имеют 2 и 3 последствия, систему можно считать средней по уровню защищенности (множества угроз T_2 и T_3)	Условие 5 Если будут нивелированы угрозы, имеющие 1, 2 и 3 последствия, систему можно считать максимально защищенной (множества угроз T_1 , T_2 и T_3)

Рис. 2 – Правила функционирования нечеткой логики метода количественной оценки защищенности открытых ОС

Fig. 2 – Rules for the functioning of fuzzy logic for quantitative assessment of the security of open OS

В соответствии с установленными правилами, определим следующие степени защищенности ОС (лингвистические показатели защищенности ОС): «уязвимая система», «минимально защищенная система», «средне защищенная система», «максимально защищенная система». Исходя из изложенных выше данных, приходим к выводу, что наиболее под-

ходящим вариантом функции принадлежности для функционирования нечеткой логики будет треугольная форма. Учитывая рассмотренные ранее данные и введенные правила, сформированы функции принадлежности защищенности открытых ОС АС ОВД:

$$Q_y(N_{\Pi}) = \begin{cases} 1 - \frac{N_{\Pi}}{3nT_3}, N_{\Pi} \in [0; 3nT_3); \\ 0, \text{ в остальных случаях.} \end{cases}$$

$$Q_{\min}(N_{\Pi}) = \begin{cases} 1 - \frac{3nT_3 - N_{\Pi}}{3nT_3}, N_{\Pi} \in [0; 3nT_3); \\ 1 - \frac{N_{\Pi} - 3nT_3}{2nT_2}, N_{\Pi} \in [3nT_3; 3nT_3 + 2nT_2); \\ 0, \text{ в остальных случаях.} \end{cases}$$

$$Q_{\text{ср}}(N_{\Pi}) = \begin{cases} 1 - \frac{(3nT_3 + 2nT_2) - N_{\Pi}}{2nT_2}, N_{\Pi} \in [3nT_3; 3nT_3 + 2nT_2); \\ 1 - \frac{N_{\Pi} - (3nT_3 + 2nT_2)}{nT_1}, N_{\Pi} \in [3nT_3 + 2nT_2; 3nT_3 + 2nT_2 + nT_1); \\ 0, \text{ в остальных случаях.} \end{cases}$$

$$Q_{\max}(N_{\Pi}) = \begin{cases} 1 - \frac{(3nT_3 + 2nT_2 + nT_1) - N_{\Pi}}{nT_1}, N_{\Pi} \in (3nT_3 + 2nT_2; 3nT_3 + 2nT_2 + nT_1]; \\ 0, \text{ в остальных случаях.} \end{cases}$$

где: $Q_y(N_{\Pi})$ – принадлежность к множеству «уязвимая система»;
 $Q_{\min}(N_{\Pi})$ – принадлежность к множеству «минимально защищенная система»;
 $Q_{\text{ср}}(N_{\Pi})$ – принадлежность к множеству «средне защищенная система»;
 $Q_{\max}(N_{\Pi})$ – принадлежность к множеству «максимально защищенная система»;
 N_{Π} – количество последствий.

На основании функций принадлежности сформирован график функции соответствия диапазонов принадлежности степени защищенности открытых ОС (рис. 3).

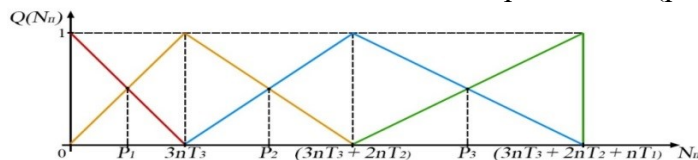


Рис. 3 – График функции соответствия диапазонов принадлежности степени защищенности открытых ОС

Fig. 3 – Graph of the function of correspondence between membership ranges of the degree of security of open OS

На рис. 3 область принадлежности к множеству «уязвимая система» обозначена красным цветом (от 0 до $3nT_3$), область принадлежности к множеству «минимально защищенная система» обозначена оранжевым цветом (от 0 до $3nT_3 + 2nT_2$), область принадлежности к множеству «средне защищенная система» обозначена синим цветом (от $3nT_3$ до $3nT_3 + 2nT_2 + nT_1$), область принадлежности к множеству «максимально защищенная система» обозначена зеленым цветом (от $3nT_3 + 2nT_2$ до $3nT_3 + 2nT_2 + nT_1$). Учитывая пересечения областей принадлежности, степени защищенности открытых ОС предполагают следующие диапазоны: «уязвимая система» – от 0 до P_1 (включительно), «минимально защищенная система» – от P_1 до P_2 (включительно), «средне защищенная система» – от P_2 до P_3 (включительно), «максимально защищенная система» – от P_3 до $3nT_3 + 2nT_2 + nT_1$ (включительно).

При рассмотрении данного способа в контексте расчета защищенности открытых ОС АС ОВД, стоит отметить, что при использовании эталонного профиля защиты предполагается, что реализация всех его требований (полная реализация на 100%) нивелирует все возможные последствия угроз (их число составляет $3nT_3 + 2nT_2 + nT_1$). В случаях реализации

в ОС меньшего количества требований пропорционально уменьшается процент защищенности ОС. Исходя из этого, выборка угроз напрямую влияет на процент защищенности системы.

Третий этап предполагает расчет показателя защищенности анализируемой ОС, а также оценивание полученного показателя защищенности ОС. На данном этапе производится вычисление соответствия политик безопасности, предположений безопасности, целей безопасности, целей безопасности для среды функционирования, функциональных требований, требований доверия к безопасности анализируемой ОС (либо профиля защиты анализируемой ОС) профилю защиты эталонной ОС, после чего производится расчет показателя защищенности анализируемой ОС по формуле:

$$Q_{\text{защ.}} = \frac{\sum P_{\text{выб.}} + \sum SA_{\text{выб.}} + \sum O_{\text{выб.}} + \sum OE_{\text{выб.}} + \sum F_{\text{выб.}} + \sum R_{\text{выб.}}}{P_{\text{эт.}} + SA_{\text{эт.}} + O_{\text{эт.}} + OE_{\text{эт.}} + F_{\text{эт.}} + R_{\text{эт.}}} \times 100\%$$

- где $\sum P_{\text{выб}}$ – рассчитанное значение выбранных политик безопасности;
 $\sum SA_{\text{выб}}$ – рассчитанное значение выбранных предположений безопасности;
 $\sum O_{\text{выб}}$ – рассчитанное значение выбранных целей безопасности;
 $\sum OE_{\text{выб}}$ – рассчитанное значение выбранных целей безопасности для среды функционирования;
 $\sum F_{\text{выб}}$ – рассчитанное значение выбранных функциональных требований;
 $\sum R_{\text{выб}}$ – рассчитанное значение выбранных требований доверия;
 $P_{\text{эт}}$ – эталонное значение политик безопасности;
 $SA_{\text{эт}}$ – эталонное значение выбранных предположений безопасности;
 $O_{\text{эт}}$ – эталонное значение целей безопасности;
 $OE_{\text{эт}}$ – эталонное значение выбранных целей безопасности для среды функционирования;
 $F_{\text{эт}}$ – эталонное значение функциональных требований;
 $R_{\text{эт}}$ – эталонное значение требований доверия.

После проведения расчета показателя защищенности анализируемой ОС производится оценивание полученного показателя в соответствии с графиком, представленным на рис. 3, и табл. 1.

Таблица 1. Определение степени защищенности ОС

Table 1. Determining the degree of OS security

Показатель защищенности ОС/OS security indicator	Степень защищенности ОС/OS security level
от 0 до P_1 (включительно)	«Уязвимая система»
от P_1 до P_2 (включительно)	«Минимально защищенная система»
от P_2 до P_3 (включительно)	«Средне защищенная система»
от P_3 до $3nT_3 + 2nT_2 + nT_1$ (включительно)	«Максимально защищенная система»

Вывод. Предложенная математическая модель является одной из составных частей Метода количественной оценки защищенности открытых ОС при их выборе в АС ОВД.

Рассмотренная в настоящем исследовании математическая модель является уникальной, не имеющей прямых аналогов на данный момент, и представляет собой новый, перспективный подход к решению задачи количественной оценки защищенности открытых ОС. Полученные в ходе реализации математической модели показатели защищенности позволяют проводить оценку ОС во временном диапазоне в динамике, осуществлять контроль требований безопасности при разработке защищенных ОС, а также осуществлять оптимальный выбор ОС для ОВД РФ.

Библиографический список:

1. ГОСТ Р ИСО/МЭК 15408-1-2012. Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Критерии оценки безопасности информационных технологий. Часть 1. Введение и общая модель [Электронный ресурс] – Режим доступа. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200101777> (Дата обращения: 01.08.2024).

2. ГОСТ Р ИСО/МЭК 15408-2-2013. Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Критерии оценки безопасности информационных технологий. Часть 2. Функциональные компоненты безопасности [Электронный ресурс] – Режим доступа. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200105710> (Дата обращения: 01.08.2024).
3. ГОСТ Р ИСО/МЭК 15408-3-2013. Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Критерии оценки безопасности информационных технологий. Часть 3. Требования доверия к безопасности [Электронный ресурс] – Режим доступа. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200105711> (Дата обращения: 01.08.2024).
4. Алгоритмизация расчета оценки защищенности операционных систем АИС ОВД, разработанного на основе анализа требований безопасности ГОСТ Р ИСО/МЭК 15408 и возможных угроз / А.И. Янгиров, Е.А. Rogozin, О.И. Бокова, С.Б. Ахлюстин // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2023. – Т. 50, № 3. – С. 167-171. – DOI 10.21822/2073-6185-2023-50-3-167-171. – EDN QIOPOE.
5. Разработка автоматизированной системы расчета оценки защищенности операционных систем информационных систем на основе анализа требований безопасности / А.И. Янгиров, Е.А. Rogozin, Е.Ю. Никулина, А.В. Калач // Вестник Воронежского института ФСИН России. – 2022. – № 4. – С. 182-188. – EDN BNBXNZ.
6. Банк данных угроз безопасности информации – [Электронный ресурс] – Режим доступа. – URL: <https://bdu.fstec.ru/> (Дата обращения: 04.08.2024).
7. Информационное сообщение от 18 октября 2016 г. № 240/24/4893 «Об утверждении Требований безопасности информации к операционным системам» ФСТЭК России – [Электронный ресурс] – Режим доступа. – URL: <https://fstec.ru/dokumenty/vse-dokumenty/informatsionnye-i-analiticheskie-materialy/informatsionnoe-soobshchenie-fstek-rossii-ot-18-oktyabrya-2016-g-n-240-24-4893> (Дата обращения: 20.07.2024).
8. Способ вычисления количественного показателя защищенности автоматизированных систем на основе требований ГОСТ Р ИСО/МЭК 15408-1-2013/И.Г. Дровникова, А.А. Никитин, А.А. Змеев//Вестник ВИ МВД России. 2015. №3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sposob-vychisleniya-kolichestvennogo-pokazatelya-zaschischyonnostiavtomatizirovannyh-sistem-na-osnove-trebovaniy-gost-r-iso-mek-15408> (Дата обращения: 04.08.2024).
9. Разработка системы исследования информационной безопасности организации на основе метода анализа иерархии / Е.А. Арфьева, М.А. Сафронова, А.В. Никитина // Известия ТулГУ. Технические науки. 2016. №11-1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-sistemy-issledovaniya-informatsionnoy-bezopasnosti-organizatsii-na-osnove-metoda-analiza-ierarhii> (Дата обращения: 04.08.2024).
10. Использование «Общих критериев» для построения систем автоматизированного проектирования комплексов средств защиты информации/ М.А. Багаев, М.В. Коротков, Е.А. Rogozin // Вопросы защиты информации: науч. практич. журнал. – М.: ФГУП «ВИМИ», 2003. Вып. 4 (63). – С. 57.
11. К вопросу проведения количественной оценки защищенности открытых операционных систем АС ОВД РФ на основе теории нечеткой логики /А.И. Янгиров, И.М. Янгиров, Е.А. Rogozin, С.Б. Ахлюстин // Охрана, безопасность, связь. – 2024. – № 9-1. – С. 163-170. – EDN FKQAIL.
12. Защита критически важных объектов инфраструктуры от террористических атак: сборник передового опыта. URL: <https://www.un.org/securitycouncil/ctc/sites/www.un.org>. (дата обращения 10.08.2024).
13. Правила категорирования объектов критической информационной инфраструктуры Российской Федерации, утвержденные постановлением Правительства Российской Федерации от 8 февраля 2018 г. № 127 «Об утверждении Правил категорирования объектов критической информационной инфраструктуры Российской Федерации, а также перечня показателей критериев значимости объектов критической информационной инфраструктуры Российской Федерации и их значений».

References:

1. GOST R ISO/IEC 15408-1-2012. Information technology. Security techniques. Evaluation criteria for IT security. Part 1. Introduction and general model – [Electronic resource] – Access mode. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200101777> (Date of access: 01.08.2024).
2. GOST R ISO/IEC 15408-2-2013. Information technology. Security techniques. Evaluation criteria for IT security. Part 2. Security functional components – [Electronic resource] – Access mode. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200105710> (Date of access: 01.08.2024).
3. GOST R ISO/IEC 15408-3-2013. Information technology. Security techniques. Evaluation criteria for IT security. Part 3. Security assurance requirements – [Electronic resource] – Access mode. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200105711> (Date of access: 01.08.2024).
4. Algorithmization for calculating the security assessment of ais operating systems of internal affairs bodies, developed on the basis of an analysis of security requirements GOST R ISO/IEC 15408 and possible threats. A.I. Yangirov, E.A. Rogozin, O.I. Bokova, S.B. Ahlyustin. *Herald of Daghestan State Technical University. Technical Science*. 2023; 50(3):167-171. – DOI 10.21822/2073-6185-2023-50-3-167-171. – EDN QIOPOE.

5. Development of an automated system for calculating the security assessment of operating systems of information systems based on the analysis of security requirements. A.I. Yangirov, E.A. Rogozin, E.Yu. Nikulina, A.V. Kalach. *Herald of Voronezh Institute of the Russian Federal Penitentiary Service*. 2022;4: 182-188. – EDN BNBXNZ.
6. Databank of information security threats – [Electronic resource] – Access mode. – URL: <https://bdu.fstec.ru/> (Date of access: 04.08.2024).
7. Information message dated October 18, 2016 № 240/24/4893 «On approval of Information Security Requirements for operating systems» FSTEC of Russia – [Electronic resource] –Access mode. – URL: <https://fstec.ru/dokumenty/vse-dokumenty/informatsionnye-i-analiticheskie-materialy/informatsionnoe-soobshchenie-fstek-rossii-ot-18-oktyabrya-2016-g-n-240-24-4893> (Date of access:20.07.2024).
8. The method of calculating the quantitative indicator of security of the automated systems on the basis of GOST R 15408-1-2013 / Drovnikova I.G., Nikitin A.A., Zmeev A.A. // Herald of Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia. 2015. №3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/spособ-vychisleniya-kolichestvennogo-pokazatelya-zaschischyonnosti-avtomatizirovannyh-sistem-na-osnove-trebovaniy-gost-r-iso-mek-15408> (Date of access: 04.08.2024).
9. Development of information security research organization on the basis of method of analysis hierarchy / E.A. Arefeva, M.A. Safronova, A.V. Nikitina // Tula State University News. Technical sciences. 2016. №11-1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-sistemy-issledovaniya-informatsionnoy-bezopasnosti-organizatsii-na-osnove-metoda-analiza-ierarhii> (Date of access: 04.08.2024).
10. Using «General Criteria» for Building Automated Design Systems for Information Security Systems / M.A. Bagaev, M.V. Korotkov, E.A. Rogozin. *Voprosy zaschityi informatsii: nauch.-praktich. zhurnal*. M.: FGUP «VIMI», 2003; 4 (63):5–7.
11. On the issue of quantitative assessment of the security of open operating systems AS ATS of the Russian Federation based on the theory of fuzzy logic / A.I. Yangirov, I.M. Yangirov, E.A. Rogozin, S.B. Ahlyustin. *Security, safety, communications*. 2024;9(1):163-170. – EDN FKQAIL.
12. Protecting Critical Infrastructure from Terrorist Attacks: A Compendium of Best Practices URL: <https://www.un.org/securitycouncil/ctc/sites/www.un.org>. (Date of access: 10.08.2024).
13. Rules for the categorization of critical information infrastructure objects of the Russian Federation, approved by Decree of the Government of the Russian Federation dated February 8, 2018 № 127 «On approval of the Rules for the categorization of critical information infrastructure objects of the Russian Federation, as well as a list of indicators of criteria for the significance of critical information infrastructure objects of the Russian Federation and their meanings».(In Russ)

Сведения об авторах:

Адил Илдарович Янгиров, начальник отделения лабораторных исследований и испытаний; adil-yan@yandex.ru

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

Петр Михайлович Дуплякин, преподаватель кафедры радиотехнических систем и комплексов охранного мониторинга; 00008540@mail.ru

Татьяна Вячеславовна Мещерякова, доктор технических наук, начальник кафедры автоматизированных информационных систем ОБД; mescher73@mail.ru

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

Information about authors:

Adil I. Yangirov, Head of the Laboratory Research and Testing; adil-yan@yandex.ru

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

Pyotr M. Duplyakin, Lecturer, Department of Radio Engineering Systems and Security Monitoring Complexes; 00008540@mail.ru

Tatyana V. Meshcheryakova, Dr. Sci. (Eng.), Head of the Department of Automated Information Systems of Internal Affairs Bodies; mescher73@mail.ru

Aleksey O. Efimov, Lecturer, Department of Automated Information Systems of Internal Affairs Bodies; 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 20.12.2024.

Одобрена после рецензирования / Reviced 29.01.2025.

Принята в печать /Accepted for publication 12.05.2025.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 666.972. 16.

DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-2-180-189



Обзорная статья / Review article

Оптимизация асфальтобетонных покрытий: достижения в области активации и гидрофобизации минеральных порошков

М.А. Высоцкая, Я.М. Катрич, К.В. Мешкова

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова,
308012, г. Белгород, ул. Костюкова 46, Россия

Резюме. Цель. Задача исследования заключается в оценке влияния различных методов обработки минеральных порошков на формирование качественных и долгосрочных характеристик асфальтобетонных покрытий. В статье раскрывается тема производства и применения активированных и гидрофобизированных минеральных порошков в контексте возможности их применения в асфальтобетонных покрытиях на основе анализа, обобщения и систематизации информации, полученной из открытых отечественных и зарубежных источников. **Метод.** Включает поисково-теоретический анализ и систематизацию существующих российских и зарубежных исследований, оценку прочностных и эксплуатационных характеристик асфальтобетона с добавлением обработанных порошков, и сравнительный анализ результатов. **Результат.** Изучен практический опыт применения минеральных порошков, основное внимание уделяется различиям в методах обработки, их влиянию на характеристики асфальтобетона и определению оптимальных условий применения каждого из методов для нужд транспортно-дорожного комплекса в качестве заполнителя. Исследования показали, что любой вид воздействия на минеральный порошок для асфальтобетона, будь то активация или гидрофобизация, значительно увеличивает его реакционную способность по отношению к битуму. Химическая активация минерального порошка улучшает механические свойства и устойчивость асфальтобетонов к химическим реагентам, в то время как посредством гидрофобизации наполнителей возможно значительно увеличить морозостойкость композита и его сопротивление водной эрозии. **Вывод.** Выбор метода и состава обработки минерального порошка целесообразно определять индивидуальными условиями эксплуатации асфальтовых покрытий, в виду того, что каждый метод потенциально перспективен, однако максимально проявляет свои свойства только в конкретных эксплуатационных обстоятельствах.

Ключевые слова: асфальтобетон; минеральный порошок; органические вяжущие вещества; химическая активация; гидрофобизация

Для цитирования: М.А. Высоцкая, Я.М. Катрич, К.В. Мешкова. Оптимизация асфальтобетонных покрытий: достижения в области активации и гидрофобизации минеральных порошков. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025; 52(2):180-189. DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-2-180-189

Optimization of Asphalt Concrete Coatings: Advances in Activation and Hydrophobization of Mineral Powders

M.A. Vysotskaya, Ya.M. Katrich, K.V. Meshkova

V.G. Shukhov Belgorod State Technological University,
46 Kostyukova St., Belgorod 308012, Russia

Abstract. Objective. The objective of the study is to assess the influence of various methods of processing mineral powders on the formation of high-quality and long-term characteristics of asphalt concrete pavements. The article covers the topic of production and application of activated and hydrophobized mineral powders in asphalt concrete pavements. **Method.** The method includes a search and theoretical analysis, as well as the systematization of existing Russian and

foreign studies. **Result.** The practical experience of using mineral powders has been studied, the main attention is paid to the differences in processing methods, their influence on the characteristics of asphalt concrete and the determination of the optimal conditions for the use of each method for the needs of the transport and road complex as a filler. Research has shown that any type of impact on mineral powder for asphalt concrete, whether activation or hydrophobization, significantly increases its reactivity with bitumen. Chemical activation of mineral powder improves the mechanical properties and resistance of asphalt concrete to chemical reagents, while by means of hydrophobization of fillers it is possible to significantly increase the frost resistance of the composite and its resistance to water erosion. **Conclusion.** The choice of method and composition for treating mineral powder should be determined by the individual operating conditions of asphalt pavements. Each method is potentially promising, but it exhibits its maximum properties only in specific operational circumstances.

Keywords: asphalt concrete; mineral powder; organic binders; chemical activation; hydrophobization

For citation: M.A. Vysotskaya, Ya.M. Katrich, K.V. Meshkova. Optimization of Asphalt Concrete Coatings: Advances in Activation and Hydrophobization of Mineral Powders. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2025; 52(2):180-189. (In Russ) DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-2-180-189.

Введение. Асфальтобетон – это полидисперсный композиционный материал, включающий щебень, песок, минеральный порошок и органическое вяжущее вещество. При этом, отмечается [1], что роль вяжущего в асфальтобетоне выполняет не отдельно взятый битум, а совокупность систем «битум-минеральный порошок», иначе - асфальтовяжущее вещество (АВВ). Интенсифицировать процессы взаимодействия в такой системе возможно посредством модифицирования битумного вяжущего различного рода добавками ПАВ [2], либо комплексным подходом к проектированию состава органических вяжущих [3-5]. С точки зрения активации битума, представляет интерес, воздействие электромагнитных полей или СВЧ обработка [6]. Однако, ввиду специфики свойств битумного вяжущего, подверженного динамичному изменению свойств во времени, подобные приемы регулирования реакционной способности битума могут носить краткосрочный эффект, зависящий от ряда факторов. Минеральный порошок, выполняющий не только в составе АВВ, но и в асфальтобетонном композите в целом, может также выполнять функцию структурообразователя.

На наш взгляд, подобный технологический прием является наиболее перспективным и целесообразным, позволяющим дуально решить комплексную проблему повышения качества асфальтобетонных смесей за счет формирования прочных коррозионо-устойчивых контактов на границе разделов «минеральный заполнитель-битум-минеральный порошок» и рационального природопользования, так как позволяет расширить сырьевую базу получения минеральных порошков, а также интенсифицировать их реакционную способность посредством направленной активации поверхности.

Как демонстрирует научно-производственный опыт [7-9], показатели ключевых свойств системы «битум – минеральный порошок» или АВВ определяются индивидуальными характеристиками слагаемых компонентов. Особенно ярко выражаются эти зависимости при оценке реологических параметров системы, напрямую зависящих от процессов протекающих на границе раздела фаз.

Постановка задачи. В современном дорожном материаловедении большое значение придается использованию инновационных материалов, которые могут улучшить качество и продлить срок службы асфальтобетонных покрытий. К числу таких материалов возможно отнести активированные и гидрофобизированные минеральные порошки, обеспечивающие значительное улучшение свойств асфальтобетона [10].

Задача исследования заключается в оценке влияния различных методов обработки минеральных порошков на формирование качественных и долгосрочных характеристик

асфальтобетонных покрытий. Ключевые вопросы аналитического исследования: как активация и гидрофобизация влияют на прочность, морозостойкость и долговечность асфальтобетона; какие специфические условия определяют применение каждого из методов; какие последствия для эксплуатации дорожного покрытия несет каждый из рассматриваемых подходов.

Методы исследования. Исследование базируется на анализе научных работ и публикаций, экспериментальных данных, полученных как в лабораторных, так и производственных условиях. Анализируются результаты исследований, проведенных в ведущих научных учреждениях России и за рубежом, а также применения данных технологий на практике. Начиная от технологического оформления процесса получения активированного минерального порошка и до их использования в составе асфальтобетонных смесей.

Обсуждение результатов. В соответствии с ГОСТ Р 52129-2003 и ГОСТ 32761-2014, в роли минерального порошка могут выступать неактивированные карбонатные (например, известняк) и некарбонатные горные породы, твердые и порошковые отходы промышленного производства. Принято говорить об активации исключительно карбонатных горных пород. В отраслевой терминологии используются термины: гидрофобизация и активация минерального порошка.

Гидрофобизация – это нанесение на поверхность минерального порошка специальных составов, в целях предотвращения разрушающего действия воды: набухания, водонасыщения. Активация – прием повышения реакционной способности или адгезионной активности минеральных материалов при взаимодействии с органическим вяжущим. Термин применим к микронаполнителям из кислых пород при использовании приемов механоактивации.

В общем виде, для активированных минеральных порошков характерны специфические свойства, приобретаемые материалами после гидрофобизации. Таким образом, в ряде случаев, активацию минерального порошка можно рассматривать как частный случай гидрофобизации. Среди основных преимуществ гидрофобизированных порошков – повышение водо- и морозостойкости, а также долговечности покрытий, снижение риска разрушения покрытия дорожной одежды [11,12]. Однако стоимость таких материалов может быть выше, чем у традиционных минеральных порошков, что требует дополнительных экономических расчетов и анализа целесообразности их применения в конкретных условиях [13].

Также есть мнение [13], что увеличение начальных затрат при использовании гидрофобизированных порошков оправдано за счет снижения затрат на ремонт и обслуживание дорожного покрытия в долгосрочной перспективе. С экологической точки зрения, интересен рециклинг вторсырья в обработанные минеральные порошки и их воздействие на окружающую среду [14]. Учитывая важность минерального порошка как структурообразующего компонента асфальтобетонных смесей, ряд исследователей рассматривают его активацию и гидрофобизацию как прием направленного регулирования свойств дорожного композита - асфальтобетона.

Так, коллектив авторов [15] предлагает комплексный способ активации минерального порошка путем одновременного перемешивания и измельчения карбонатной породы и гидрофобизатора. Частицы минерального порошка в момент измельчения характеризуются наибольшей химической активностью, за счет чего между добавкой и поверхностью частиц минерального компонента возникают прочные связи, интенсифицирующие адгезию с битумом, что в последствии способствует улучшению физико-технологических показателей асфальтобетонных смесей и асфальтобетона в покрытии.

Известно [16] получение для асфальтобетонной смеси активированного минерального порошка на основе карбонатных пород, где в качестве активатора выступает гидрофобизатор - жирная кислота, температура плавления которой не более 85°C и армирующая добавка в виде волокон. Объединение компонентов и активация производятся в центробежной мельнице.

Также известен состав минерального порошка [17] на основе минерального компонента с добавлением гидрофобизатора и цемента. Все компоненты объединяются и измельчаются, за счет чего происходит активация зерен минерального порошка с последующей гидрофобизацией.

Предложен способ [18] активации минеральных порошков посредством их перемешивания с органическим соединением при нагревании до 100-200°C. Активация микронаполнителя для асфальтобетона производится с целью повышения водоустойчивости асфальтобетонного покрытия. В качестве активатора выступает остаточный продукт производства диметилтерефталата, полученный после колонны многоцелевой дистилляции.

В одном из патентов [19] описана возможность активация дисперсного микронаполнителя асфальтобетонных смесей добавками на основе жировых отходов переработки морских рыб, сланцевого масла и вязкого битума. В соответствии с изобретением, предусматривается смешение обозначенных компонентов в диапазоне температур 105-110°C до однородного состояния. После чего, полученную смесь объединяли с глинистым известняком, содержащим глинистые примеси не более 25%. Завершающим этапом являлось измельчение полученной смеси в шаровой мельнице до необходимой дисперсности.

В качестве минеральной составляющей также могут выступать и отходы промышленных производств, например, шлак электрометаллургического комбината [20]. Для активации его размалывают, затем на свежесформованную поверхность вводят гидрофобизатор-препарат ГФ-1. После прохождения всех технологических этапов на выходе получается активированный минеральный порошок, значительно улучшающий свойства асфальтобетона. Известно [21], что возможна активация минерального порошка комбинацией из силикагеля и золошлаковых отходов, полученных при термическом обезвреживании нефтесодержащих отходов. Отличительной особенностью предлагаемого метода является подход к совместному измельчению компонентов.

Для этого использовалась шаровая мельница, принцип действия которой состоит в измельчении материала ударом, а также частичном истирании во вращающемся барабане свободно падающих мелющих тел в виде чугунных или стальных шаров. Заключительным этапом является отбор предварительно подготовленного материала фракции (0,07-0,31 мм). Узкую фракцию сырья совместно с гашеной известью загружают в смеситель, предварительно смешивают, после чего на минеральную массу вводят гидрофобное ПАВ. Завершающим этапом является конечное перемешивание до получения однородной смеси.

Еще одним из способов активации является введение химически активных минеральных компонентов. В исследовании [22] установлено, что величина адсорбции битума на поверхности минеральных порошков увеличивается пропорционально содержанию извести в минеральной части АВВ. Также возрастает структурирующая способность известьсодержащего порошка.

Вопросы повышения качества минерального порошка в дорожно-строительном материаловедении решаются не только с позиции активации поверхности химическими веществами и добавками. Также популярное направление – это технологическое оформление процесса его производства. Известным фактом является то, что в процессе помола порошков изменяются геометрические параметры его частиц: размер, форма и шероховатость. Это оказывает влияние на поверхностную энергию, проявление магнитных, электрических, молекулярных сил и число контактов с вяжущим веществом.

Установлено, что процесс механической активации приводит к нарушению и преобразованию кристаллической решетки вещества вплоть до перехода его в аморфное состояние. Отмечается [23], что получение минерального порошка для нужд дорожного строительства возможно посредством термальной подготовки горной породы: нагрева, сушки, – с последующим помолом в шаровой мельнице (рис. 1).



Рис. 1 - Схема шаровой мельницы [23]

Fig. 1 - Ball mill diagram [23]

Такой способ является простым и надежным. Ввиду высокой производительности размольного оборудования, используемого в цементной промышленности, он получил широкую применимость для получения минеральных порошков для дорожно-строительного сегмента промышленности. В технологии активации минеральных порошков для асфальтобетонных смесей, также нашли применение горючие сланцы [24]. Модификация зерен микронаполнителя достигается посредством совместного измельчения минерального сырья и органического компонента. Решающая роль в этом случае отводится процессу смешения, в результате которого происходит механохимическая активация порошка в устройствах для измельчения при свободном ударе, а также при стесненном ударе с истиранием.

Получение активированного минерального порошка предлагается [25] также посредством помола щебня фракции 0,5-5 мм. Рассматриваемая технология предусматривает установление технологической линии непосредственно на АБЗ и внесение полученного компонента в асфальтобетонную смесь в короткие временные сроки. Подготовленный исходный материал измельчается в шаровой мельнице. Особенностью способа [25], отличающей его от известных технологических решений, является то, что дисперсный наполнитель, со свежесформированными поверхностями, смешивают с 1-2% битума. В соответствии с предлагаемой технологией, период между обработкой битумом и помолом должен составлять не более 10 мин. Полученный активированный микронаполнитель используется как компонент асфальтобетонной смеси, до этого он подлежит хранению в силосе. Схема приготовления асфальтобетона из механоактивированного минерального порошка представлена на рис. 2.

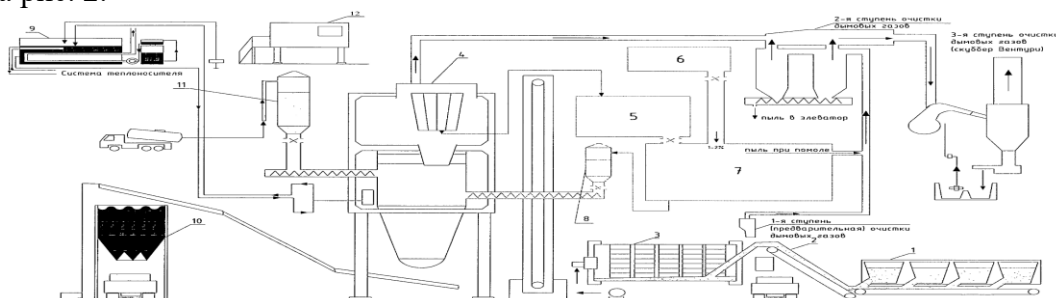


Рис. 2 - Схема включения механоактивированного минерального порошка в технологию приготовления асфальтобетонной смеси на базе установки ДС-168 [25]

Fig. 2 - Scheme of inclusion of mechanically activated mineral powder in the technology of preparation of asphalt concrete mixture based on the DS-168 unit [25]

Коллектив авторов [26] предлагает применять карбонатную породу определенного фракционного состава для производства активированного минерального порошка. Процесс активации происходит следующим образом: из бункера-накопителя карбонатная порода транспортируется в сушильный барабан, с температурой внутри барабана в диапазоне 120-140°C, для достижения содержания влаги в породе не более 0,5%. Подвергшаяся сушке порода, одновременно с активирующей смесью, разогретой до температуры 90-120°C и состоящей из битума и поверхностно-активных веществ (ПАВ), поступает в смеситель-

ную установку. Минеральный материал и активирующая добавка тщательно перемешиваются до достижения равномерного распределения последней, после чего подвергаются совместному помолу. Еще один оригинальный метод [27] получения активированного дисперсного наполнителя включает в себя следующие этапы: помол исходной породы, предпочтительно из карбонатных пород; агломерация дисперсных зерен посредством прессования, после чего, в зоне дезагломерации выполняется посредством горячих газов распушение полученных этапом ранее агломератов.

По мнению изобретателей [28], образование готового продукта происходит как следствие процесса пылеотделения, возникающего в потоке горячих газов при перемешивании дисперсного компонента с активирующей смесью. Некондиционный материал через обратную систему подачи направляется на доизмельчение. Производство минерального порошка для асфальтобетонных смесей описывается в патенте [28]. Производственная линия включает в себя компоненты, изображенные в виде блок-схемы на рис. 3.

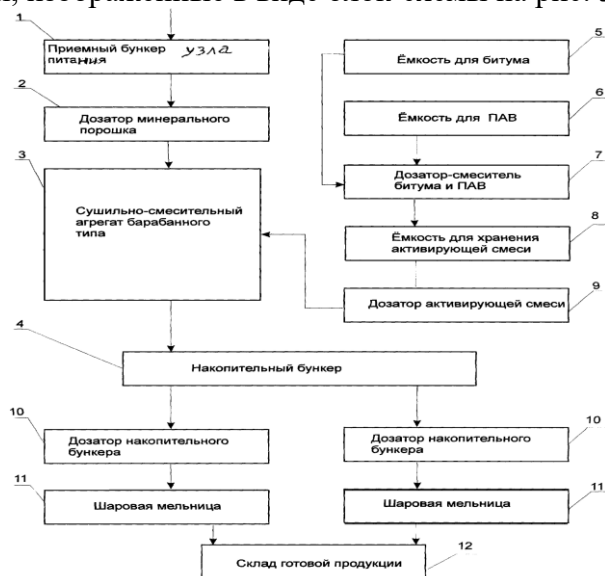


Рис. 3 - Блок-схема технологической линии по приготовлению активированного минерального порошка [28]

Fig. 3 - Block diagram of the technological line for the preparation of activated mineral powder [28]

Отличительной особенностью описываемого технологического решения является совмещение сушки и смешения в одном технологическом узле. Конструкция представляет из себя сушильно-смесительный агрегат барабанного типа, в который через систему дозаторов поступает активирующая смесь и минеральный порошок. При этом, бункер-накопитель оборудован как минимум двумя дозаторами и шаровыми мельницами, установленными параллельно. Измельченный готовый продукт из мельниц поступает на склад готовой продукции. Обобщенный технологический процесс производства минерального порошка может быть представлен следующими этапами (рис. 4):

1. Минеральная составляющая поступает из бункера в сушилку;
2. Производится сушка минеральной части
3. Высушенный материал поступает в мельницу
4. В мельнице материал измельчается до необходимой тонкости помола
5. После или во время измельчения, в зависимости от выбранной технологии, вносятся гидрофобизирующие добавки в концентрациях согласно инструкциям.

Анализ публикаций демонстрирует, что активация зерен минерального порошка происходит за счет измельчения в мельницах, а последующая гидрофобизация или активация минеральных порошков достигается за счет обработки поверхности частиц специализированными химическими реагентами, такими как силиконовые эмульсии, жирные кислоты или фторорганические соединения.

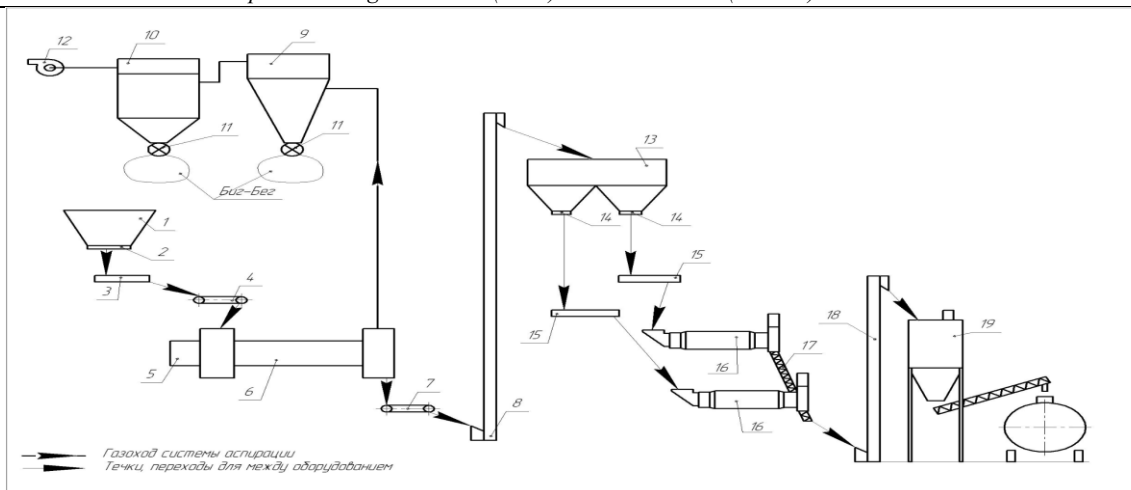


Рис. 4 - Схема производства гидрофобизированных минеральных порошков

1 - Бункер сырого материала, 2 - Задвижка шиберная, 3 - Питатель вибрационный, 4 - Конвейер ленточный, 5 - Газовая горелка, 6 - Сушильный барабан, 7 - Питатель ленточный с высокотемпературной лентой, 8 - Элеватор ленточный, 9 - Циклон групповой, 10 - Фильтр рукавный, 11 - Питатель шлюзовый, 12 - Дымосос, 13 - Бункер сухого материала, 14 - Задвижка шиберная, 15 - Питатель вибрационный, 16 - Шаровая мельница 1456А, 17 - Конвейер виттовой, 18 - Элеватор ленточный, 19 - Силос.

Fig. 4 - Scheme of production of hydrophobized mineral powders

1 - Raw material bin, 2 - Gate valve, 3 - Vibrating feeder, 4 - Belt conveyor, 5 - Gas burner, 6 - Drying drum, 7 - Belt feeder with high-temperature belt, 8 - Belt elevator, 9 - Group cyclone, 10 - Bag filter, 11 - Airlock feeder, 12 - Smoke exhauster, 13 - Dry material bin, 14 - Gate valve, 15 - Vibrating feeder, 16 - Ball mill 1456A, 17 - Vitt conveyor, 18 - Belt elevator, 19 - Silo.

Обработка наполнителей позволяет защитить их от проникновения влаги через, стабилизируя их гидрофобные свойства. Измененная поверхность зерен минерального порошка посредством гидрофобизации характеризуется повышенной способностью к смачиваемости битумом, низкой слеживаемостью при хранении и транспортировке, минимизирует возможность адсорбции влаги, в том числе из окружающего воздуха. Становится возможным регулировать пористость микронаполнителя и, как следствие, битумоемкость.

Вывод. Использование активированных минеральных порошков является одним из наиболее перспективных направлений в современном дорожном строительстве. Такие порошки позволяют не только улучшить физико-механические свойства асфальтобетона, но и значительно продлить его срок службы за счет регулирования морозостойкости и водонепроницаемости, что, в общем случае, увеличивает коррозионную устойчивость асфальтобетона в покрытии. Гидрофобизация и активация минеральных порошков заключается в обработке поверхности частиц веществами, изменяющими их химическую и физическую структуру. Для этих целей используются различные реагенты, в том числе кислоты, щелочи и соли, которые способствуют повышению реакционной способности порошков в асфальтобетонной смеси. Такая обработка не только улучшает их взаимодействие с битумными связующими, но и способствует уменьшению пористости и улучшению эксплуатационных показателей асфальтобетонных покрытий, повышает устойчивость покрытий к воздействиям окружающей среды, а в совокупности увеличивает срок их службы.

Среди недостатков можно отметить увеличивающуюся стоимость таких материалов и потенциальную агрессивность активаторов к окружающей среде.

Технологический контроль за процессом активации критичен для обеспечения качества и однородности конечного продукта и играет ключевую роль в производстве активированного порошка. Он должен включать анализ физико-химических свойств материала, таких как размер частиц, химический состав и активность. В долгосрочной перспективе использование активированных порошков может быть экономически целесообразным техническим решением за счет снижения затрат на ремонт и содержание дорожных покрытий.

Библиографический список:

1. Высоцкая М.А., Лесовик В.С., Катрич Я.М., Егоров Д.Ю. Влияние минеральных порошков на устойчивость битумного вяжущего к термическим деформациям//«Вестник СибАДИ». 2024;21(5):770-785. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-5-770-785>. EDN: RSHWAO
2. Zhao Wenbin. The effect of fundamental mixture parameters on hot-mix asphalt performance properties: Doctor of Philosophy dissertation in civil engineering. 2011.
3. Inozemtsev S., Korolev E. Surface modification of mineral filler using nanoparticles for asphalt application // MATEC Web of Conferences, Rostov-on-Don, 17-21 september 2018 years. - Rostov-on-Don: EDP Sciences, 2018. 04052. doi:<https://doi.org/10.1051/mateconf/201819604052>
4. Pirmohammad S., Khoramishad H., Ayatollahi M.R. Effects of asphalt concrete characteristics on cohesive zone model parameters of hot mix asphalt mixtures. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 2016;43(3): 226–232
5. Mechanical tests for bituminous mixes. characterization, design and quality control: Proceedings of the Fourth International RILEM Symposium / E. Eustacchio, H.W. Fritz eds. Taylor & Francis, 2004. 672 p
6. Акимов А. Е., Ядыкина В. В., Гридчин А. М. Применение токов СВЧ для повышения характеристик дорожных битумов// Construction materials. 2010. №1.URL:<https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-tokov-svch-dlya-povysheniya-harakteristik-dorozhnyh-bitumov> (дата обращения: 01.12.2024).
7. Копылов В.Е. Активация минеральных порошков, как способ улучшения физико-механических характеристик асфальтовых бетонов / В.Е. Копылов, О.Н. Буренина, Е.А. Павлова // Интернет-журнал «Науковедение». – 2017. - Том 9, № 5. – URL.: <https://naukovedenie.ru/PDF/48TVN517.pdf>
8. Гезенцевей Л.Б. Дорожный асфальтобетон. / Л.Б. Гезенцевей. – Москва: Транспорт, 1985. – 350 с.
9. Ковалев Я.Н. Инновационные технологии в дорожном материаловедении // Наука и техника – 2015. – С. 9-15.
10. Weiguang Zhang. Effect of tack coat application on interlayer shear strength of asphalt pavement: A state-of-the-art review based on application in the United States // International Journal of Pavement Research and Technology. – 2017. – Vol. 10, iss. 5. – P. 434–445. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2017.07.003>
11. Миронов В.А. Улучшение качества асфальтобетона регулированием свойств сырьевых материалов / В.А. Миронов, А.И. Голубев, А.Г. Тимофеев // Строительные материалы. – 2007. – № 5. – С. 26-27.
12. Гезенцевей Л.Б. Асфальтовый бетон из активированных минеральных материалов. – Москва.: Стройиздат. – 1971. – 255 с.
13. Junfeng Gao. Effects of coarse aggregate angularity on the microstructure of asphalt mixture / Junfeng Gao, Hainian Wang, Yin Bu, Zhanping You, MohdRosliMohd Hasan, Muhammad Irfan. *Construction and Building Materials*.2018; 183: 472–484. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.170>
14. Оценка влияния степени гидратации цемента на свойства получаемого на его основе минерального наполнителя для асфальтобетонов Иноземцев С.С., Королев Е.В. Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. 2017. № 4-5 (56-57). С. 77-84.
15. Пат. 2 671 227 Российская Федерация, МПК C04B 26/26 (2006.01) C04B 20/10 (2006.01) C04B 14/26 (2006.01) C04B 11/20 (2006.01). Активированный минеральный порошок для асфальтобетонных смесей и способ его получения. / Баринов В.В., Евтухович А.Р., Емельянов А. Н., Перьков А.Л., Серикова Е.Д.; ООО "Воронежский завод минерального порошка". № 2017128040; заявл. 04.08.2017; опубл. 30.10.2018 Бюл. № 31.
16. Пат. 2 568 620 Российская Федерация, МПК C04B 26/26(2006.01) C04B 20/02(2006.01) C04B 14/28(2006.01) C04B 14/40(2006.01) C04B 16/06(2006.01) C04B 11/20(2006.01). Способ получения и состав активированного армированного минерального порошка. / В.А. Полубабкин, А.А.Еремян, А.Ю. Дедюхин // №2014142679/03; заявл. – 2014.10.22; опубл. 2015.11.20
17. Пат. 2 715 403 Российская Федерация, МПК C04B 26/26(2006.01). Минеральный порошок для асфальтобетонной смеси. / Шаталов А. А., Серикова Е. Д.; ООО "Воронежский завод минерального порошка". № 2019132545, заявл. 2019.10.14; опубл. 2020.02.27
18. SU381674 A1 , МПК C04B 20/02(2006.01) C08L 95/00(2006.01) 1970.07.20. Способ активации минеральных порошков. /Ставицкий В.Д. Заявка: 1461729/29-33, Дата подачи заявки: 1970.07.20 Опубликовано: 1973.05.22. тор: Ставицкий В.Д.
19. SU 1713232 A1 МПК C04B 26/26(2006.01). Минеральный порошок для асфальтобетонной смеси. / Сотникова В.Н., Нээдрит Э.Р. Пяркман А.Я. Заявка: 04458775, Дата подачи заявки: 1988.07.11 Опубликовано: 1993.11.30.
20. Ядыкина В.В. Повышение эффективности минерального порошка из техногенного сырья за счет его гидрофобизации / В. В. Ядыкина, А. М. Гридчин, Е. В. Кузнецова [и др.] // Строительные материалы и изделия. – 2020. – Т. 3, № 4. – С. 24-30.
21. Пат. 2 627 881 Российская Федерация, МПК C08L 95/00(2006.01) C08J 11/00(2006.01) C04B 26/26(2006.01). Способ получения активированного органоминерального порошка для асфальтобетонных смесей / Ишков А.Г., Акопова Г.С., Стрекалова Л.В., Голушко В.В. Общество с ограниченной ответственностью "Научно-исследовательский институт природных газов и газовых технологий Заявка: 2016139806, 2016.10.10. Дата подачи заявки: 2016.10.10. Опубликовано: 2017.08.14.

22. Высоцкая, М.А. Известь в асфальтобетоне - такая простая и сложная / М.А. Высоцкая, В.В. Ядыкина, Д.А. Кузнецов // Строительные материалы. – 2006. – № 3. – С. 56-58. – EDN HTQGYH.
23. Ширяев А.О., М.А. Высоцкая. Минеральный порошок в современной системе проектирования асфальтобетонных систем.// Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2022. - № 2. – С. 8-19. URL: <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2021-7-2-8-19>.
24. Пат. 2 131 854 Российская Федерация, МПК C04B 20/10(2006.01) C04B 26/26 (2006.01). Способ получения минерального порошка для асфальтобетонных смесей. / Руденский А.В., Горлов Е.Г., Головин Г.С., Шур Б.В., Миронов Ю.П. Начало действия: 1998.07.06 Публикация: 1999.06.20 Подача: 1998.07.06.
25. Пат. 2 450 991 Российская Федерация, МПК C04B 26/26(2006.01). Заявка: 2010132428/03, 2010.08.02. Способ получения минерального порошка для асфальтобетонной смеси. / Ядыкина В.В. Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова". Дата подачи заявки: 2010.08.02 Опубликовано: 2012.05.20.
26. Пат. 2 256 628 Российская Федерация, МПК C04B 26/26(2006.01). Активированный минеральный порошок для асфальтобетонной смеси. / Сергута А.М., Дымов С.А. Дата подачи заявки: 2004.04.22. Опубликовано: 2005.07.20
27. Пат. 2 173 306 Российская Федерация, МПК C04B 20/ 10(2000.01) C04 B 26/26(2000.01). Способ производства активированного минерального порошка для асфальтобетонных смесей / Дубов В.А. Соколов Н.В. Чулков В.В. Закрытое акционерное общество "Волгоцемсервис". Заявка: 98121739/03, 1998.11.24. Дата подачи заявки: 1998.11.24. Опубликовано: 2001.09.10.
28. Пат. 49835 Российская Федерация, МПК E01C 19/10(2000.01). Технологическая линия для производства активированного минерального порошка, используемого для приготовления асфальтобетонных смесей /Кузнецов И.О., Дружбин Г.А., Карапира Н.И., Миронов С.Г. Заявка: 2005116516/22, 2005.05.31. Дата подачи заявки: 2005.05.31. Опубликовано: 2005.12.10.

References:

1. Vysotskaya M.A., Lesovik V.S., Katrich Ya.M., Egorov D.Yu. Influence of mineral powders on the thermal deformation resistance of bituminous binders. Scientific peer-reviewed journal "Bulletin of SibADI". 2024;21(5):770-785. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-5-770-785>. EDN: RSHWAO (In Russ)
2. Zhao Wenbin. The effect of fundamental mixture parameters on hot-mix asphalt performance properties: Doctor of Philosophy dissertation in civil engineering. 2011.
3. Inozemtsev S., Korolev E. Surface modification of mineral filler using nanoparticles for asphalt application. MATEC Web of Conferences, Rostov-on-Don, 17-21 September 2018. Rostov-on-Don: EDP Sciences, 2018. 04052. doi:<https://doi.org/10.1051/mateconf/201819604052>
4. Pirmohammad S., Khoramishad H., Ayatollahi M.R. Effects of asphalt concrete characteristics on cohesive zone model parameters of hot mix asphalt mixtures. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 2016;43(3): 226–232.
5. Mechanical tests for bituminous mixes. characterization, design and quality control: Proceedings of the Fourth International RILEM Symposium / E. Eustacchio, H.W. Fritz eds. Taylor & Francis, 2004. 672 p
6. Akimov A.E., Yadykina V.V., Gridchin A.M. Application of microwave currents to improve the properties of road bitumens. Construction materials. 2010. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primeneniye-tokov-svch-dlya-povysheniya-harakteristik-dorozhnyh-bitumov> (accessed: 01.12.2024). (In Russ)
7. Kopylov V.E. Activation of mineral powders as a method for improving the physicomechanical properties of asphalt concretes. V.E. Kopylov, O.N. Burenina, E.A. Pavlova. Online journal "Naukovedenie". 2017; 9(5). URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/48TVN517.pdf> (In Russ)
8. Gezentsvey L.B. Road asphalt concrete. L.B. Gezentsvey. Moscow: Transport, 1985. 350 p. (In Russ)
9. Kovalev Ya.N. Innovative technologies in road materials science. Science and Technology. 2015;9-15(In Russ).
10. Weiguang Zhang. Effect of tack coat application on interlayer shear strength of asphalt pavement: A state-of-the-art review based on application in the United States. *International Journal of Pavement Research and Technology*. 2017;10(5):434–445. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2017.07.003>
11. V.A. Mironov, A.I. Golubev, A.G. Timofeev. Improving the quality of asphalt concrete by regulating the properties of raw materials. *Construction Materials*. 2007; 5:26-27. (In Russ) (In Russ)
12. L.B. Gezentsvey. Asphalt concrete from activated mineral materials. Moscow: Stroyizdat. 1971;255. (In Russ)
13. Junfeng Gao, Hainian Wang, Yin Bu, Zhanping You, MohdRosliMohd Hasan, Muhammad Irfan. Effects of coarse aggregate angularity on the microstructure of asphalt mixture. *Construction and Building Materials*. 2018;183: 472–484. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.170>(In Russ)
14. S.S. Inozemtsev, E.V. Korolev. Assessment of the influence of the degree of cement hydration on the properties of mineral filler for asphalt concrete obtained on its basis. *Bulletin of the Siberian State Automobile and Highway University*. 2017; 4-5 (56-57):77-84. (In Russ)

15. Pat. 2 671 227 Russian Federation, IPC C04B 26/26 (2006.01) C04B 20/10 (2006.01) C04B 14/26 (2006.01) C04B 111/20 (2006.01). Activated mineral powder for asphalt concrete mixtures and method for its production. Barinov V.V., Evtukhovich A.R., Emelyanov A.N., Perkov A.L., Serikova E.D.; LLC "Voronezh Mineral Powder Plant". No. 2017128040; appl. 08/04/2017; publ. 10/30/2018 Bull.31. (In Russ)
16. Pat. 2 568 620 Russian Federation, IPC C04B 26/26 (2006.01) C04B 20/02 (2006.01) C04B 14/28 (2006.01) C04B 14/40 (2006.01) C04B 16/06 (2006.01) C04B 111/20 (2006.01). Method for producing and composition of activated reinforced mineral powder. V.A. Polubabkin, A.A. Eremyan, A.Yu. Dedyukhin // No. 2014142679/03; appl. – 2014.10.22; publ. 2015.11.20 (In Russ)
17. Pat. 2 715 403 Russian Federation, IPC C04B 26/26 (2006.01). Mineral powder for asphalt concrete mixture. / Shatalov A.A., Serikova E.D.; LLC "Voronezh Mineral Powder Plant". No. 2019132545, appl. 2019.10.14; publ. 2020.02.27. (In Russ)
18. SU381674 A1, IPC C04B 20/02 (2006.01) C08L 95/00 (2006.01) 1970.07.20. Method for activating mineral powders. /Stavitsky V.D. Application: 1461729/29-33, Filing date:1970.07.20 Published:1973.05.22. Author: Stavitsky V.D. (In Russ)
19. SU 1713232 A1 IPC C04B 26/26 (2006.01). Mineral powder for asphalt concrete mixture. Sotnikova V.N., Neidrit E.R., Parkman A.Ya. Application:04458775, Filing date:1988.07.11 Published:1993.11.30. (In Russ)
20. V.V. Yadykina, A.M. Gridchin, E.V. Kuznetsova [et al.]. Improving the efficiency of mineral powder from technogenic raw materials through its hydrophobization. *Construction Materials and Products*. 2020;13(4):24-30. (In Russ)
21. Pat. 2 627 881 Russian Federation, IPC C08L 95/00(2006.01) C08J 11/00 (2006.01) C04B 26/26 (2006.01). Method for producing activated organic-mineral powder for asphalt concrete mixtures. / Ishkov A.G., Akopova G.S., Strekalova L.V., Golushko V.V. Limited Liability Company "Research Institute of Natural Gases and Gas Technologies". Application: 2016139806, 2016.10.10. Filing date: 2016.10.10. Published: 2017.08.14. (In Russ)
22. M.A. Vysotskaya, V.V. Yadykina, D.A. Kuznetsov. Lime in asphalt concrete - so simple and complex. *Construction Materials*. 2006. No. 3. P. 56-58. EDN HTQGYH. (In Russ)
23. A.O. Shiryayev, M.A. Vysotskaya. Mineral powder in the modern design system of asphalt concrete mixtures. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2022; 2:8-19. URL: <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2021-7-2-8-19>. (In Russ)
24. Pat. 2 131 854 Russian Federation, IPC C04B 20/10 (2006.01) C04B 26/26 (2006.01). Method for producing mineral powder for asphalt concrete mixtures. Rudensky A.V., Gorlov E.G., Golovin G.S., Shur B.V., Mironov Yu.P. Application date: 1998.07.06 Publication: 1999.06.20 Filing: 1998.07.06. (In Russ)
25. Pat. 2 450 991 Russian Federation, IPC C04B 26/26 (2006.01). Application: 2010132428/03, 2010.08.02. Method for producing mineral powder for asphalt concrete mixture. Yadykina V.V. State Educational Institution of Higher Professional Education "Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov". Filing date: 2010.08.02 Published: 2012.05.20. (In Russ)
26. Pat. 2 256 628 Russian Federation, IPC C04B 26/26 (2006.01). Activated mineral powder for asphalt concrete mixture. Serguta A.M., Dymov S.A. Filing date: 2004.04.22. Published: 2005.07.20. (In Russ)
27. Pat. 2 173 306 Russian Federation, IPC C04B 20/10 (2000.01) C04B 26/26 (2000.01). Method for production of activated mineral powder for asphalt concrete mixtures. Dubov V.A., Solodkov N.V., Chulkov V.V. Closed Joint Stock Company "Volgotseservice". Application: 98121739/03, 1998.11.24. Filing date: 1998.11.24. Published: 2001.09.10. (In Russ)
28. Pat. 49835 Russian Federation, IPC E01C 19/10 (2000.01). Technological line for production of activated mineral powder used for preparation of asphalt concrete mixtures. Kuznetsov I.O., Druzhbin G.A., Karapira N.I., Mironov S.G. Application:2005116516/22,2005.05.31.Filing date:2005.05.31.Published: 2005.12.10. (In Russ)

Сведения об авторах:

Марина Алексеевна Высоцкая, кандидат технических наук, доцент, доцент, кафедра «Автомобильные и железные дороги»; goruri@rambler.ru

Ярослав Михайлович Катрич, аспирант; yaroslavkatrich@mail.ru

Кристина Владимировна Мешкова, аспирант; kristinka.msh@mail.ru

Information about authors:

Marina A. Vysotskaya, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Assoc. Prof., Department «Automobiles and railways»; roruri@rambler.ru

Yaroslav M. Katrich, Postgraduate Student; yaroslavkatrich@mail.ru

Kristina V. Meshkova, Postgraduate Student; kristinka.msh@mail.ru

Конфликт интересов / Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/ Received 30.04.2025.

Одобрена после рецензирования / Reviced 27.05.2025.

Принята в печать /Accepted for publication 10.06.2025.



Численно-аналитический метод в решении задачи ползучести пологой оболочки

М.А. Магомедов¹, В.В. Кузнецов², Б.М. Языев³, С.В. Литвинов³

¹Дагестанский государственный технический университет,
¹367015, г. Махачкала, проспект Имама Шамиля, 70, Россия,

²Комплексный научно-исследовательский институт им. Х.И. Ибрагимова РАН,
²364051, г. Грозный, В. Алиева (Старопромысловское шоссе), 21а, Россия,

³Донской государственный технический университет,
³344002, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина 1, Россия

Резюме. Цель. В работе представлены общие уравнения моментной теории тонких пологих оболочек, имеющих относительно небольшой подъем над плоскостью своей проекции с учетом деформации ползучести. Рассматривается задача о напряженном-деформированном состоянии оболочки, с граничными условиями. При расчете принимали, что по краям оболочка соединена с диафрагмами, абсолютно жесткими в их плоскости и гибкими из нее. Получены разрешающие уравнения для расчета пологих изотропных и ортотропных оболочек с учетом деформаций ползучести. Задача свелась к системе из двух дифференциальных уравнений четвертого порядка относительно прогиба и функции напряжений. **Метод.** Решение приводится численно-аналитическим методом в программном комплексе MATLAB. Нелинейное уравнение Максвелла-Гуревича использовано как уравнение состояния между деформациями ползучести и напряжениями. Для определения деформаций ползучести применялась линейная аппроксимация первой производной по времени (метод Рунге-Кутты). Для верификации решения задачи был произведен расчет оболочки 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. Установлено, что напряжения и внутренние усилия в ортотропной оболочке той же формы, что для изотропной, происходит перераспределение напряжений: нормальные напряжения возрастают, а касательные убывают. Продольные и сдвигающие силы при этом остаются практически постоянными; изменение напряжений происходит в основном за счёт перераспределения изгибающих и крутящих моментов. **Вывод.** Предложенный подход может быть применен к анализу напряженно-деформированного состояния и несущей способности также и железобетонной оболочки. Ограничений по граничным условиям и видам нагружения нет, а материалом балки могут быть не только полимеры и композиты строительного назначения, но и бетон.

Ключевые слова: ползучесть бетона, неупругие коэффициенты, относительная деформация, уравнение связи Максвелла-Гуревича, изгибающие моменты, переменная жесткость, двойные тригонометрические ряды

Для цитирования: М.А. Магомедов, В.В. Кузнецов, Б.М. Языев, С.В. Литвинов. Численно-аналитический метод в решении задачи ползучести пологой оболочки. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025;52(2):190-200. DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-2-190-200

Numerical-analytical method in solving the problem of creep of a shallow shell

М.А. Magomedov¹, V.V. Kuznetsov², B.M. Yazyev³, S.V. Litvinov³

¹Daghestan State Technical University,
¹70 I. Shamil Ave., Makhachkala 367015, Russia,

²Kh.I. Ibragimov Integrated Research Institute of the Russian Academy of Sciences,

²364051, Grozny, V. Aliyeva (Staropromyslovskoe shosse), 21a, Russia,

³Don State Technical University,

³¹ Gagarina Square, Rostov-on-Don 344002, Russia

Abstract. Objective. The paper presents general equations of the moment theory of thin shallow shells with a relatively small rise above the plane of their projection taking into account creep deformation. The problem of the stress-strain state of the shell with boundary conditions is considered. At the edges, the shell is connected to diaphragms that are absolutely rigid in their plane and flexible from it. Resolving equations are obtained for calculating shallow isotropic and orthotropic shells taking into account creep deformations. The problem is reduced to a system of two fourth-order differential equations with respect to deflection and stress function. **Method.** The solution is given by the numerical-analytical method in the MATLAB software package. The non-linear Maxwell-Gurevich equation is used as the equation of state between creep deformations and stresses. To determine creep deformations, a linear approximation of the first derivative with respect to time (Runge-Kutta method) was used. To verify the solution to the problem, a shell made of secondary PVC was calculated using the grid method. The method has been tested by comparing the solution with the calculations of other well-known researchers. **Result.** A program has been developed for calculation in the MATLAB package with the ability to vary the initial data and output a graph of the dependence of displacements and stresses on time. It has been established that stresses and internal forces in an orthotropic shell of the same shape as for an isotropic one are subject to stress redistribution: normal stresses increase, and tangential stresses decrease. Longitudinal and shear forces remain almost constant; stress changes occur mainly due to the redistribution of bending and torque moments. **Conclusion.** The proposed approach can be applied to the analysis of the stress-strain state and bearing capacity of a reinforced concrete shell as well. There are no restrictions on boundary conditions and types of loading, and the beam material can be not only polymers and composites for construction purposes, but also concrete.

Keywords: concrete creep, inelastic coefficients, relative deformation, Maxwell-Gurevich constraint equation, bending moments, variable stiffness, double trigonometric series

For citation: M.A. Magomedov, V.V. Kuznetsov, B.M. Yazyev, S.V. Litvinov. Numerical-analytical method in solving the problem of creep of a shallow shell. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2025; 52(2):190-200. (In Russ) DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-2-190-200.

Введение. Пологие оболочки широко применяются для устройства большепролетных перекрытий, поэтому их рассмотрение представляет особенный интерес. Напряженное состояние пологой оболочки является переходным от невыгодного чисто моментного напряженного состояния пластины к выгодному безмоментному состоянию оболочки [1, 3, 4]. Пологие оболочки занимают промежуточное положение между изгибаемыми плитами и безмоментными оболочками, соединяя преимущества первых в части распределения материала по перекрываемой площади с преимуществом оболочек в части распределения напряжений по толщине.

Здесь рассматриваются пологие оболочки прямоугольного в плане очертания, которые наиболее распространены в строительной практике в качестве перекрытий различного рода сооружений [5-7]. Даже в тех случаях, когда строгое решение принципиально возможно, числовой расчет и получение окончательного результата сопряжены большей частью с очень большими трудностями.

Постановка задачи. Рассмотрим прямоугольный в плане бесконечно малый элемент пологой оболочки размерами $dx \times dy$, на боковых гранях которого действуют усилия в срединной поверхности (рис.1, а), а также моменты и поперечные силы (рис. 1, б). Нормально к срединной поверхности приложена внешняя поперечная нагрузка q . (рис. 1), уравнение поверхности которой имеет вид:

$$z = f(x, y)$$

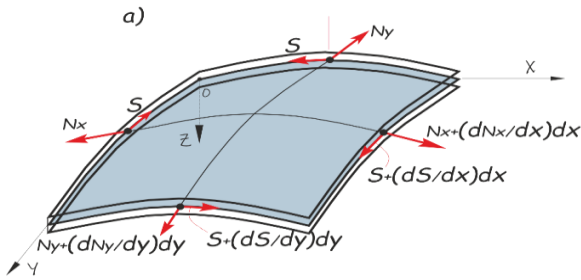


Рис. 1. а) Срединная поверхность полой оболочки

Fig. 1. a) Middle surface of the shallow shell

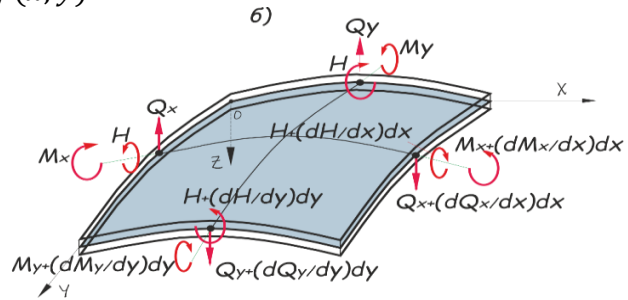


Рис. 1 б) Усилия в элементе полой оболочки

Fig. 1 б) Efforts in a shallow shell element

При наличии ползучести геометрические и статические уравнения теории пологих оболочек остаются неизменными. Изменения происходят только в физических уравнениях. Вывод разрешающих уравнений. Уравнение равновесия имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_x}{\partial x} + \frac{\partial S}{\partial y} &= 0; \quad \frac{\partial S}{\partial x} + \frac{\partial N_y}{\partial y} = 0; \\ \frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} - k_x N_x - k_y N_y + q &= 0, \\ \frac{\partial M_x}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial y} &= Q_x; \quad \frac{\partial M_y}{\partial y} + \frac{\partial H}{\partial x} = Q_y; \end{aligned} \quad (1)$$

где N_x, N_y – продольные силы; S – сдвигающая сила; M_x, M_y – изгибающие моменты; H – крутящий момент; Q_x, Q_y – поперечные силы; q – поверхностная нагрузка.

Исключим из этих уравнений поперечные силы Q_x, Q_y проинтегрировав последнюю строку уравнения (1) по x, y и подставив в 2-ю строку уравнения (1), имеем обобщающее уравнение равновесия

$$\frac{\partial^2 M_x}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial^2 H}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 M_y}{\partial y^2} - k_x N_x - k_y N_y + q = 0. \quad (2)$$

Геометрические соотношения согласно [6,7], полные деформации, есть сумма составляющих деформаций срединной поверхности и деформаций, связанных с изменением кривизны:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma^0 \end{Bmatrix} + z \begin{Bmatrix} \chi_x \\ \chi_y \\ \chi_{xy} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

где u, v, w – перемещения срединной поверхности в соответствии координат x, y, z .

В (3) первое слагаемое – деформации срединной поверхности, второе слагаемое – изменения кривизн срединной поверхности. Введем обозначения:

$$(a) \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma^0 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} k_x \\ k_y \\ 0 \end{Bmatrix} w; \quad (б) \begin{Bmatrix} \chi_x \\ \chi_y \\ \chi_{xy} \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \\ \frac{\partial^2}{\partial y^2} \\ \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \end{bmatrix} w \quad (4)$$

где u, v, w – перемещения срединной поверхности в соответствии координат x, y, z .

Уравнение совместности деформаций можно получить из (4а) проинтегрировав ε_x^0 и ε_y^0 по x и y соответственно, и суммируя их имеем:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial^2}{\partial y^2} & \frac{\partial^2}{\partial x^2} & -\frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma^0 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2}{\partial y^2} & \frac{\partial^2}{\partial x^2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} (k_x w) \\ (k_y w) \end{Bmatrix} \quad (5)$$

Если $k_{xy} = -\frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} = 0$, из чего следует, что k_x и k_y – главные кривизны, уравнение совместности деформаций (5) принимает вид:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial^2}{\partial y^2} & \frac{\partial^2}{\partial x^2} & -\frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma^0 \end{Bmatrix} = k_x \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + k_y \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}. \quad (6)$$

Физические соотношения с учетом деформаций ползучести на основе первой гипотезы теории расчёта оболочек, как и пластинок, зависимость напряжений от деформаций принимается в виде:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{(1-\nu)}{2} \end{bmatrix} \left(\begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma^0 \end{Bmatrix} + z \begin{Bmatrix} \chi_x \\ \chi_y \\ \chi_{xy} \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^{cr} \\ \varepsilon_y^{cr} \\ \gamma_{xy}^{cr} \end{Bmatrix} \right); \quad (7)$$

Усилия, изгибающие и крутящий момент имеют вид:

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ S \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_x dz \\ \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_y dz \\ \int_{-h/2}^{h/2} \tau_{xy} dz \end{Bmatrix} = \frac{Eh}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{(1-\nu)}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma^0 \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} N_x^{cr} \\ N_y^{cr} \\ S^{cr} \end{Bmatrix}; \quad (8)$$

где

$$\begin{Bmatrix} N_x^{cr} \\ N_y^{cr} \\ S^{cr} \end{Bmatrix} = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{Bmatrix} \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} [1 \quad \nu \quad 0] \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^{cr} \\ \varepsilon_y^{cr} \\ \gamma_{xy}^{cr} \end{Bmatrix} dz \\ \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} [\nu \quad 1 \quad 0] \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^{cr} \\ \varepsilon_y^{cr} \\ \gamma_{xy}^{cr} \end{Bmatrix} dz \\ \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \left[0 \quad 0 \quad \frac{(1-\nu)}{2} \right] \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^{cr} \\ \varepsilon_y^{cr} \\ \gamma_{xy}^{cr} \end{Bmatrix} dz \end{Bmatrix}; \quad (9)$$

Соотношения для изгибных и крутящих моментов определяются как:

$$\begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ H \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_x z dz \\ \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_y z dz \\ \int_{-h/2}^{h/2} \tau_{xy} z dz \end{Bmatrix} = -D \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & (1-\nu) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \chi_x \\ \chi_y \\ \chi_{xy} \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} M_x^{cr} \\ M_y^{cr} \\ H^{cr} \end{Bmatrix}; \quad (10)$$

где

$$\begin{Bmatrix} M_x^{cr} \\ M_y^{cr} \\ H^{cr} \end{Bmatrix} = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{Bmatrix} \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} [1 \quad \nu \quad 0] \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^{cr} \\ \varepsilon_y^{cr} \\ \gamma_{xy}^{cr} \end{Bmatrix} z dz \\ \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} [\nu \quad 1 \quad 0] \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^{cr} \\ \varepsilon_y^{cr} \\ \gamma_{xy}^{cr} \end{Bmatrix} z dz \\ \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} [0 \quad 0 \quad \frac{(1-\nu)}{2}] \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^{cr} \\ \varepsilon_y^{cr} \\ \gamma_{xy}^{cr} \end{Bmatrix} z dz \end{Bmatrix}; \quad (11)$$

где

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \quad \text{цилиндрическая жесткость}$$

Первые 2 уравнения равновесия (1) могут быть удовлетворены, если ввести функцию напряжений по формулам:

$$N_x = \frac{\partial^2 \Omega}{\partial y^2}, \quad N_y = \frac{\partial^2 \Omega}{\partial x^2}, \quad S = -\frac{\partial^2 \Omega}{\partial x \partial y}. \quad (12)$$

Деформации срединной поверхности из (8) с учетом (12) представим, как:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma^0 \end{Bmatrix} = \frac{1}{Eh} \begin{bmatrix} 1 & -\nu & 0 \\ -\nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2(1+\nu) \end{bmatrix} \left(\begin{Bmatrix} \frac{\partial^2 \Omega}{\partial y^2} \\ \frac{\partial^2 \Omega}{\partial x^2} \\ -\frac{\partial^2 \Omega}{\partial x \partial y} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} N_x^{cr} \\ N_y^{cr} \\ S^{cr} \end{Bmatrix} \right) \quad (13)$$

Подставив (1) в уравнение совместности деформаций (6), мы получим первое разрешающее уравнение:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{Eh} \nabla^2 \nabla^2 \Omega - k_x \frac{\partial^2 \mathbf{w}}{\partial y^2} - k_y \frac{\partial^2 \mathbf{w}}{\partial x^2} = \\ & = \frac{1}{Eh} \left[2(1+\nu) \frac{\partial^2 S^{cr}}{\partial x \partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 N_x^{cr}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N_y^{cr}}{\partial y^2} \right) - \frac{\partial^2 N_x^{cr}}{\partial y^2} - \frac{\partial^2 N_y^{cr}}{\partial x^2} \right] \end{aligned} \quad (14)$$

Подставив уравнение (10) в (2), получим второе разрешающее уравнение:

$$D \nabla^2 \nabla^2 \mathbf{w} + k_x \frac{\partial^2 \Omega}{\partial y^2} + k_y \frac{\partial^2 \Omega}{\partial x^2} = q - \left(\frac{\partial^2 M_x^{cr}}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial^2 H^{cr}}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 M_y^{cr}}{\partial y^2} \right). \quad (15)$$

Таким образом получаем систему двух дифференциальных уравнений относительно двух неизвестных функций $\mathbf{w}$ и Ω .

Система дифференциальных уравнений (14) и (15) обобщает две теории упругости с учетом ползучести: задачу об изгибе пластинки и плоскую задачу [7, 8, 9].

Рассмотрим различные случаи граничных условий для прямоугольной в плане полой оболочки, кромки которой совпадают с координатными линиями x и y , являющимися линиями главных кривизн. На каждой кромке оболочки накладываются ограничения на функции w и φ , причем таких условий должно быть четыре - по два условия на каждую из функций w и φ . Заметим, что краевые условия, зависящие от прогиба оболочки, имеют точно такой же вид, что и для жестких пластин [9–12].

Так, для жестко защемленной кромки оболочки, параллельной координатной линии y (для точек этой кромки при $x = a, x = 0$ – рис.2), справедливы условия

$$w = 0|_{x=0, x=a}; \quad \frac{\partial w}{\partial x} = 0|_{x=0, x=a} \quad (16)$$

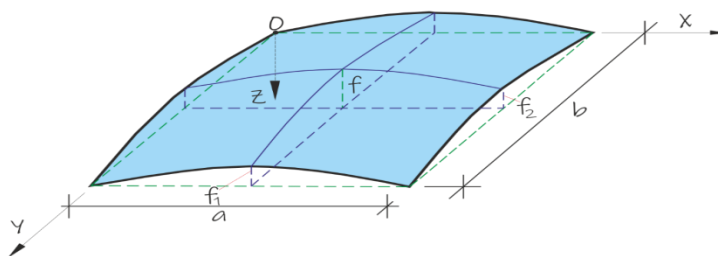


Рис. 2 - Тонкая полая оболочка

Fig. 2 - Thin shallow shell

Для шарнирно закрепленной кромки $x = a, x = 0$ аналогичные условия, которые накладываются на функцию Ω . Для кромки $x = a, x = 0$, которая может свободно перемещаться в направлении оси x ,

$$\sigma_x = 0|_{x=0, x=a}; \quad \frac{\partial^2 \Omega}{\partial y^2} = 0|_{x=0, x=a} \quad (17)$$

Для кромки $x = \pm a$, свободно смещаемой в направлении оси y ,

$$\tau_{yx} = 0|_{x=0, x=a}; \quad \frac{\partial^2 \Omega}{\partial x \partial y} = 0|_{x=0, x=a} \quad (18)$$

При решении практических задач могут встретиться различные комбинации перечисленных условий. Например, для жестко защемленной кромки $x = a, x = 0$, где исключаются перемещения в направлении осей x, y и z , следует положить

$$u = v = w = \frac{\partial w}{\partial x} = 0|_{x=0, x=a} \quad (19)$$

При свободном опирании кромок оболочки на торцевые диафрагмы (рис.3), абсолютно жесткие по отношению к деформациям в своей плоскости и гибкие из нее, граничные условия принимают следующий вид:

$$\begin{aligned} v = w = \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 \Omega}{\partial y^2} &= 0|_{x=0, x=a} \\ u = w = \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = \frac{\partial^2 \Omega}{\partial x^2} &= 0|_{x=0, x=a}; \end{aligned} \quad (20)$$

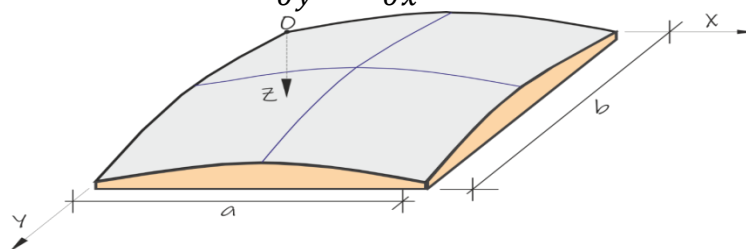


Рис. 3 - Опирание оболочки на диафрагмы

Fig. 3 - Support of the shell on the diaphragms

При расчете принимаем, что на контуре оболочки функция напряжений $\Omega = 0$, тогда на кромках $x = 0$ и $x = a$ автоматически обращается в нуль производная $\frac{\partial^2 \Omega}{\partial y^2}$, а на кромках $y = 0$, $y = b$ – производная $\frac{\partial^2 \Omega}{\partial x^2}$. Потребуем также, чтобы при $x = 0$ и $x = a$ обращалась в нуль производная $\frac{\partial^2 \Omega}{\partial x^2}$, а на кромках $y = 0$, $y = b$ – производная $\frac{\partial^2 \Omega}{\partial y^2}$. Тогда для кромок $x = 0$ и $x = a$ будем иметь:

$$\varepsilon_y^0 = \frac{1}{Eh} (N_y - \nu N_x + N_y^{cr} - \nu N_x^{cr}) = \frac{1}{Eh} \left(\frac{\partial^2 \Omega}{\partial x^2} - \nu \frac{\partial^2 \Omega}{\partial y^2} + N_y^{cr} - \nu N_x^{cr} \right) \equiv 0. \quad (21)$$

Из (21) следует, что на указанных кромках перемещение v должно быть тождественно равно константе, которую можно принять равной нулю, следовательно последнее условие в (21) выполняется. Аналогично для кромок $y = 0$ и $y = b$:

$$\varepsilon_x^0 = \frac{1}{Eh} (N_x - \nu N_y + N_x^{cr} - \nu N_y^{cr}) = \frac{1}{Eh} \left(\frac{\partial^2 \Omega}{\partial y^2} - \nu \frac{\partial^2 \Omega}{\partial x^2} + N_x^{cr} - \nu N_y^{cr} \right) \equiv 0. \quad (22)$$

Из (22) следует, что перемещение u при $y = 0$ и $y = b$ может быть равно нулю.

Методы исследования. Рассмотрим пример расчета пологой прямоугольной в плане оболочки, срединная поверхность которой представляет эллиптический параболоид (рис.). Начало координат – в левом верхнем углу. Уравнение поверхности имеет вид:

$$z = f \left[\frac{f_1}{f} \left(2 \frac{x}{a} - 1 \right)^2 + \frac{f_2}{f} \left(2 \frac{y}{b} - 1 \right)^2 - 1 \right], \quad (23)$$

Главные кривизны рассматриваемой оболочки определяются следующим образом:

$$k_x = -\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} = -\frac{8f_1}{a^2}; \quad k_y = -\frac{\partial^2 z}{\partial y^2} = -\frac{8f_2}{b^2}. \quad (24)$$

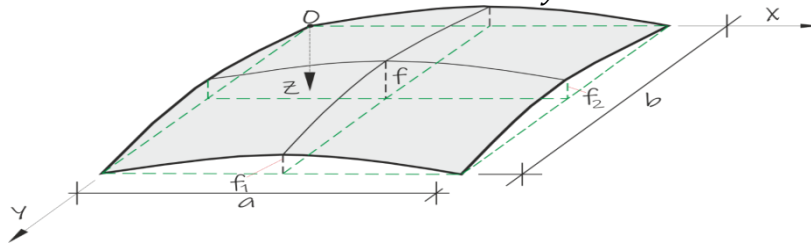


Рис. 4 - Пологая прямоугольная в плане оболочка

Fig. 4 - Flat rectangular shell

Решение системы разрешающих уравнений представляет большие трудности, поэтому целесообразно применять вариационные методы решения, например, как, метод Бубнова-Галеркина, в форме, разработанной для оболочек В.З. Власовым или Ритца-Тимошенко. Мы предлагаем решение численно-аналитическое. Будем искать решение уравнений в виде двойных тригонометрических рядов по синусам. С учетом (24) система разрешающих уравнений принимает вид:

$$\begin{aligned} \frac{1}{Eh} \nabla^4 \Omega + \frac{8f_1}{a^2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{8f_2}{b^2} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} &= f^{cr}; \\ D \nabla^4 w - \frac{8f_1}{a^2} \frac{\partial^2 \Omega}{\partial y^2} - \frac{8f_2}{b^2} \frac{\partial^2 \Omega}{\partial x^2} &= q + q^{cr}, \end{aligned} \quad (25)$$

где

$$\begin{aligned} f^{cr} &= \frac{1}{Eh} \left[2(1 + \nu) \frac{\partial^2 S^{cr}}{\partial x \partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 N_x^{cr}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N_y^{cr}}{\partial y^2} \right) - \frac{\partial^2 N_x^{cr}}{\partial y^2} - \frac{\partial^2 N_y^{cr}}{\partial x^2} \right]; \\ q^{cr} &= - \left(\frac{\partial^2 M_x^{cr}}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial^2 H^{cr}}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 M_y^{cr}}{\partial y^2} \right). \end{aligned}$$

Будем искать решение уравнений (25) в виде:

$$\begin{aligned} w(x, y) &= \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} w_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b}; \\ \Omega(x, y) &= \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \varphi_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b}. \end{aligned} \quad (26)$$

Функции (26) удовлетворяют граничным условиям. Запишем функции $q(x, y)$, $q^{cr}(x, y)$ и $f^{cr}(x, y)$ в виде:

$$\begin{aligned} q(x, y) &= \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} q_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b}; \\ q^{cr}(x, y) &= \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} q_{mn}^{cr} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b}; \\ f^{cr}(x, y) &= \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} f_{mn}^{cr} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b}. \end{aligned} \quad (27)$$

Коэффициенты разложения q_{mn} , q_{mn}^{cr} и f_{mn}^{cr} определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} q_{mn} &= \frac{4}{ab} \int_0^a \int_0^b q(x, y) \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} dx dy; \\ q_{mn}^{cr} &= \frac{4}{ab} \int_0^a \int_0^b q^*(x, y) \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} dx dy; \\ f_{mn}^{cr} &= \frac{4}{ab} \int_0^a \int_0^b f^{cr}(x, y) \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} dx dy. \end{aligned} \quad (28)$$

После подстановки (27) в (25), получим:

$$\begin{aligned} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{\pi^4}{Eh} \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right)^2 \varphi_{mn} - \frac{8\pi^2}{a^2 b^2} [n^2 f_1 + m^2 f_2] w_{mn} \right\} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} \\ = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} f_{mn}^{cr} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b}. \end{aligned} \quad (29)$$

$$\begin{aligned} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \pi^4 D \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right)^2 w_{mn} + \frac{8\pi^2}{a^2 b^2} [n^2 f_1 + m^2 f_2] \varphi_{mn} \right\} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} \\ = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} (q_{mn} + q_{mn}^{cr}) \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b}. \end{aligned}$$

Два ряда равны между собой, если равны их коэффициенты. В итоге для каждой пары коэффициентов φ_{mn} и w_{mn} имеем систему из двух линейных уравнений с двумя неизвестными:

$$\begin{bmatrix} a_{11} & -a_{12} \\ a_{12} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varphi_{mn} \\ w_{mn} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_{mn}^{cr} \\ q_{mn} + q_{mn}^{cr} \end{Bmatrix}; \quad \text{где} \quad (30)$$

$$a_{11} = \frac{\pi^4}{Eh} \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right)^2, \quad a_{12} = \frac{8\pi^2}{a^2 b^2} [n^2 f_1 + m^2 f_2]; \quad a_{22} = \pi^4 D \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right)^2$$

Из (30) коэффициенты φ_{mn} и w_{mn} определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} \varphi_{mn} &= \frac{f_{mn}^{cr} a_{22} + (q_{mn} + q_{mn}^{cr}) a_{12}}{a_{11} a_{22} + a_{12}^2}; \\ w_{mn} &= \frac{a_{11} (q_{mn} + q_{mn}^{cr}) - a_{12} f_{mn}^{cr}}{a_{11} a_{22} + a_{12}^2}. \end{aligned} \quad (31)$$

При $q(x, y) = \text{const}$ первый интеграл в (28) записывается в виде:

$$q_{mn} = \frac{4q}{ab} \int_0^a \sin \frac{m\pi x}{a} dx \int_0^b \sin \frac{n\pi y}{b} dy = \frac{4q}{mn\pi^2} \cos \frac{m\pi x}{a} \Big|_0^a \cos \frac{n\pi y}{b} \Big|_0^b =$$

$$= \begin{cases} \frac{16q}{mn\pi^2}, & \text{если } m = 2k + 1 \text{ и } n = 2p + 1 \\ 0, & \text{если } m \text{ или } n - \text{четное} \end{cases} \quad (32)$$

Последние 2 интеграла в (28) вычисляются численно. Для этого вводится равномерная сетка $\Delta x \times \Delta y$. Вычисление выполняется по формуле:

$$\int_0^a \int_0^b f(x, y) dx dy = \sum f(x_i, y_i) \Delta x \Delta y \omega_i, \quad (33)$$

где ω_i – весовой коэффициент, для внутренних узлов сетки равный 1, для узлов на контуре кроме углов $\omega_i = 0.5$, для угловых точек $\omega_i = 0.25$.

При $q(x, y) = \text{const}$ функции $q^{cr}(x, y)$ и $f^{cr}(x, y)$ следует раскладывать только по нечетным m и n . При помощи описанного подхода была решена задача, представленная в работе [1,2]. Количество интервалов по x, y, z и по времени принималось равным 100.

Обсуждение результатов. Расчет был выполнен в программном комплексе MATLAB. Для верификации правильности решения воспользуемся данными из [1]. Был выполнен расчет полимерного резервуара из вторичного ПВХ $h = 0.01$ м, $a = b = 1$ м, $f_1 = f_2 = 0.05$ м, материал оболочки – вторичный ПВХ, $E = 1480$ МПа, $E_\infty = 5990$ МПа, $m^{cr} = 12.6$ МПа, $\eta_0^{cr} = 9.06 \cdot 10^5$ МПа · мин, $\nu = 0.3$. На оболочку действует постоянная, равномерно распределенная по площади нагрузка $q = 0.5$ кПа. Приведены так же результаты, выполненные в [1,2] для верификации правильности решения. Сравнение наибольших величин прогиба в различные моменты времени, полученных методом конечных разностей (МКР) и численно-аналитически (ЧАМ) при $m, n = 1, 3, 5, 7$ приведено в табл.1. Результаты, полученные при девяти и шестнадцати членах ряда, практически совпадают. Совпадение результатов свидетельствует о их достоверности.

Таблица 1 – Сравнение наибольших перемещений в различные моменты времени, полученных МКР и численно-аналитического метода (ЧАМ)

Table 1 – Comparison of the largest displacements at different points in time obtained by the MKR and the numerical-analytical method (NAM)

t , час		1	2	3	4	5	6	7	8
w , мм	МКР	0.2547	0.2675	0.2759	0.2814	0.2850	0.2873	0.2889	0.2899
	ЧАМ	0.2547	0.2675	0.2759	0.2813	0.2849	0.2872	0.2887	0.2897

На рис. приведен график роста наибольшей величины прогиба при различном числе членов ряда.

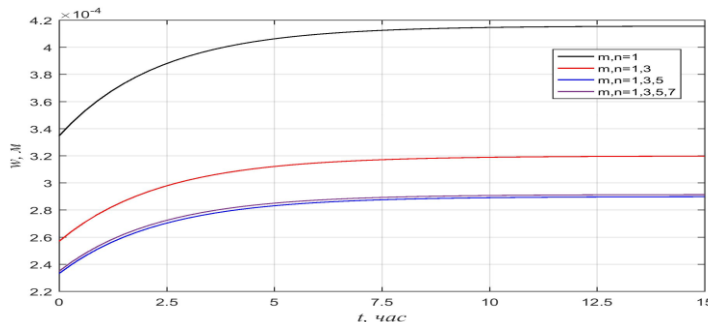
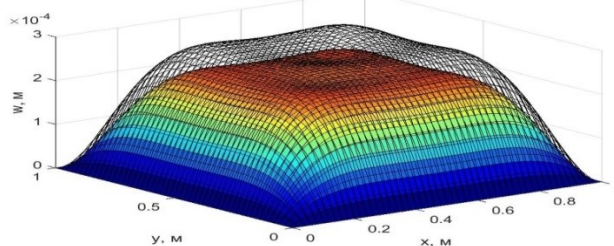


Рис. 5 - График роста наибольшей величины прогиба при различном числе членов ряда
Fig. 5 - Graph of the growth of the greatest value of deflection for different numbers of members of the series

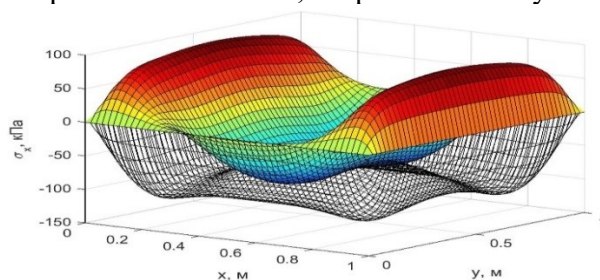
На рис.6. приведено распределение перемещений w в зависимости от x и y : закрашенная поверхность – при $t = 0$; сетчатая поверхность при $t = 15$ ч. Напряжения в процессе ползучести меняются незначительно.



**Рис. 6 – Распределение перемещений w в зависимости от x и y :
 закрашенная поверхность – при $t = 0$; сетчатая поверхность при $t = 15$ ч**

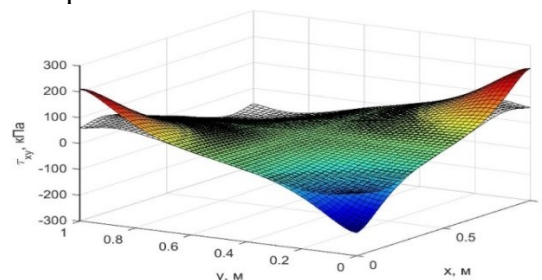
**Fig. 6 – Distribution of displacements w depending on x and y :
 shaded surface – at $t = 0$; mesh surface at $t = 15$ h.**

Распределение напряжений σ_x и τ_{xy} как функций от x и y при $t = 15$ час приведено соответственно на рис. и рис. . Сетчатым графикам соответствуют напряжения у верхней поверхности оболочки, закрашенным – у нижней поверхности.



**Рис. 7 – Распределение напряжений σ_x при $t = 15$ ч:
 сетчатая поверхность – $z = -h/2$, закрашенная поверхность – $z = h/2$**

Fig. 7 – Distribution of stresses σ_x at $t = 15$ h: mesh surface – $z = -h/2$, shaded surface – $z = h/2$



**Рис. 8 – Распределение напряжений τ_{xy} при $t = 15$ ч: сетчатая поверхность – $z = -h/2$,
 закрашенная поверхность – $z = h/2$**

Fig. 8 – Distribution of stresses τ_{xy} at $t = 15$ h: mesh surface – $z = -h/2$, shaded surface – $z = h/2$

Вывод. Получены разрешающие уравнения для расчета пологих изотропных и ортотропных оболочек с учетом ползучести. Задача свелась к системе из двух дифференциальных уравнений четвертого порядка относительно прогиба и функции напряжений. Приведен пример расчета пологой оболочки из ПВХ в форме эллиптического параболоида. В результате расчета установлено, что напряжения и внутренние усилия в изотропной оболочке в процессе ползучести практически не меняются.

Приведено численно-аналитическое решение задачи с использованием двойных тригонометрических рядов. Для изотропной оболочки достаточным оказалось 9 членов ряда. Выполнено сравнение результатов с решением на основе метода конечных разностей. Таким образом, расчет оболочки только в упругой стадии приводит к заниженным значениям напряжений, и как следствие, возможному ее разрушению в процессе эксплуатации.

Библиографический список:

1. Чепурненко А.С., Сайбель А.В., Савченко А.А. Расчет круговой цилиндрической оболочки по моментной теории с учетом ползучести // Инженерный вестник Дона, 2015, №2. http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_126_chepurnenko_saibel.pdf_3a21b7b730.pdf
2. Mailyan L.R., Chepurnenko A.S., Yazyev S.B., Yazyev B.M. Calculation of shallow polymer shell taking the creep into account // MATEC Web of Conferences 106, 04010 SPbWOSCE-2016
3. Самуль В.И. Основы теории упругости и пластичности. М.: Высшая школа, 1982. 264 с.
4. 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.
5. 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.
6. 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.

7. Монахов В.А. Теория пластин и оболочек. Пенза: ПГУАС, 2016. 252 с.
8. 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.
9. 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.
10. Крылов А.Н. О расчете балок, лежащих на упругом основании. М.: Академия наук СССР. 1931. 80 с.
11. Лалин В. В., Колосова Г. С. Численные методы в строительстве. СПб. Изд-во СПбГТУ, 2001. 71 с.
12. 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.
13. Milind T. R., Date P. P. Analytical and finite element modeling of strain generated in equal channel angular extrusion // *International Journal of Mechanical Sciences*. 2012. V. 56. № 1. P. 26–34.

References:

1. Chepurnenko A.S., Saibel A.V., Savchenko A.A. Calculation of a circular cylindrical shell using the moment theory taking into account creep. *Engineering Bulletin of the Don*, 2015;2. http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_126_chepurnenko_saibel.pdf_3a21b7b730.pdf (In Russ)
2. Mailyan L.R., Chepurnenko A.S., Yazyev S.B., Yazyev B.M. Calculation of shallow polymer shell taking the creep into account // *MATEC Web of Conferences* 106, 04010 SPbWOSCE-2016
3. Samul V.I. Fundamentals of the theory of elasticity and plasticity. Moscow: Vysshaya shkola, 1982;264 (In Russ)
4. 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.
5. 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;1004–1005:257–260.
6. Yazyev B.M., Chepurnenko A.S., Litvinov S.V., Kozelskaya M.Yu. Stress-strain state of prestressed reinforced concrete cylinder taking into account concrete creep. *Scientific Review*. 2014;11:759–763 (In Russ)
7. Monakhov V.A. Theory of plates and shells. Penza: PSUAS, 2016. 252 p. (In Russ)
8. 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.
9. 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.
10. Krylov A.N. On the calculation of beams lying on an elastic foundation. Moscow: USSR Academy of Sciences. 1931.80 p. (In Russ)
11. Lalin V.V., Kolosova G.S. Numerical methods in construction. St. Petersburg. Publishing House of St. Petersburg State Technical University, 2001. 71 p. (In Russ)
12. Lou T., Xiang Y. Numerical analysis of second-order effects of externally prestressed concrete beams. *Structural engineering and mechanics*. 2010;35(5):631–643.
13. Milind T. R., Date P. P. Analytical and finite element modeling of strain generated in equal channel angular extrusion. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2012;56(1):26–34. (In Russ)

Сведения об авторах:

Марсель Айдемирович Магомедов, аспирант, кафедра «Строительная механика»; marsmag05@ya.ru; ORCID 0000-0001-5517-919X;

Владимир Вячеславович Кузнецов, соискатель; ibm2225101@gmail.com; ORCID0009-0009-3688-4737

Батыр Меретович Языев, доктор технических наук, профессор, профессор, кафедра «Строительная механика и теория сооружений»; ps62@yandex.ru; ORCID 0000-0002-5205-1446

Степан Викторович Литвинов, кандидат технических наук, доцент, доцент, кафедра «Строительная механика и теория сооружений»; ps62@yandex.ru; ORCID 0000-0001-5729-1425.

Information about authors:

Marcel A. Magomedov, Postgraduatet, Department of Structural Mechanics; marsmag05@ya.ru; ORCID 0000-0001-5517-919X;

Vladimir V. Kuznetsov, Applicant; ibm2225101@gmail.com. ORCID 0009-0009-3688-4737

Batyr M. Yazyev, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Prof., Department of Structural Mechanics and Theory of Structures; ps62@yandex.ru ; ORCID 0000-0002-5205-1446

Stepan V. Litvinov, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Assoc. Prof., Department of Structural Mechanics and Theory of Structures; ps62@yandex.ru ; ORCID 0000-0001-5729-1425

Конфликт интересов / Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/ Received 24.01.2025.

Одобрена после рецензирования / Reviced 26.02.2025.

Принята в печать /Accepted for publication 20.05.2025.

**Исследование параметров внутреннего воздуха жилого здания
при усовершенствовании системы вытяжной вентиляции**

О.Ю. Маликова¹, Д.Ф. Карпов², Т.В. Сазонова³

¹Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет,

¹129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26, Россия,

²Вологодский государственный университет,

²160000, г. Вологда, ул. Ленина, 15, Россия,

³Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет,

³190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., 4, Россия

Резюме. Цель. Качество воздуха в зданиях определяется различными факторами, в том числе, решениями по организации воздухообмена и системам вентиляции помещений. Уровень относительной влажности, температуры внутреннего воздуха и концентрация загрязняющих веществ играют ключевую роль в создании комфортной среды жизнедеятельности. Целью исследования является разработка рекомендаций к проектированию вытяжной вентиляции в жилых зданиях. **Метод.** Натурные исследования закономерности изменения тепловлажностных параметров воздуха в кухне-гостиной в условиях естественной и принудительной вытяжной вентиляции в расчетных точках, а также время восстановления теплового баланса в помещении (квартире). **Результат.** Установлено, что температура воздуха менялась в диапазоне 23,1-24,6 °С, относительная влажность – в диапазоне 38,7-50,3 %, что соответствует допустимому диапазону, но не оптимальному. Применение вытяжки над плитой дает устойчивое снижение температуры во всех точках на 1-1,5 °С; относительной влажности в рабочей зоне у плиты – на 10-20 %, в верхней зоне и у вытяжки – до 30 %. Выход на температурное плато значений до начала эксперимента с применением вытяжного зонта над плитой произошел на 30 мин. быстрее, чем при естественной вентиляции. **Вывод.** Правильное проектирование вытяжной системы над кухонной плитой с использованием зонта и встроенного вентилятора способствует предотвращению конденсации влаги на поверхностях и улучшает характеристики микроклимата в обслуживаемой зоне.

Ключевые слова: температура внутреннего воздуха, относительная влажность, тепловые притоки, естественная вентиляция, зонт, качество воздуха, микроклимат помещений

Для цитирования: О.Ю. Маликова, Д.Ф. Карпов, Т.В. Сазонова. Исследование параметров внутреннего воздуха жилого здания при усовершенствовании системы вытяжной вентиляции. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025;52(2):201-210. DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-2-201-210

**Investigation of internal air parameters in a residential building when improving the
exhaust ventilation system**

O.Y. Malikova¹, D.F. Karpov², T.V. Sazonova³

¹National Research Moscow State University of Civil Engineering,

¹26, Yaroslavskoe Highway, Moscow 1129337, Russia,

²Vologda State University,

²15 Lenin St., Vologda 160000, Russia,

³Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering,

³4, 2nd Krasnoarmeiskaya St., Saint Petersburg 190005, Russia

Abstract. Objective. Air quality in buildings is determined by various factors, including: decisions on air exchange and ventilation systems. The level of relative humidity, indoor air temperature and concentration of other pollutants play a key role in creating a comfortable living environment. The purpose of the study is to develop recommendations for the design of exhaust ventilation in residential buildings. **Method.** Natural studies of the regularity of changes in heat and humidity parameters of air in the kitchen-living room in the case of natural and forced exhaust ventilation in the design points, as well as the time of restoration of thermal balance in the room (or the flat as a whole). **Result.** It was found that the air temperature varied in the range of 23.1-24.6 °C, relative humidity – in the range of 38.7-50.3 %, which corresponds to an acceptable range, but not optimal. The use of a hood over the cooker gives a steady decrease in temperature in all points by 1-1,5 °C, and relative humidity in the working zone at the cooker – by 10-20 %, in the upper zone and at the hood – up to 30 %. Exit to the temperature plateau of values before the experiment with the use of an extraction umbrella over the cooker occurred 30 minutes faster than with natural ventilation. **Conclusion.** An improved ventilation system is required to ensure optimum indoor climate conditions. The correct design of the extraction system above the cooker with an umbrella and an integrated fan helps to prevent condensation on surfaces and improves the climate characteristics of the area served.

Keywords: indoor air temperature, relative humidity, thermal gains, natural ventilation, ventilation hood, air quality, indoor microclimate

For citation: O.Y. Malikova, D.F. Karpov, T.V. Sazonova. Investigation of internal air parameters in a residential building when improving the exhaust ventilation system. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2025;52(2):201-210. (In Russ) DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-2-201-210.

Введение. Известно, что человек проводит порядка 80 % времени в закрытых помещениях, поэтому значение влияния параметров внутреннего воздуха в гражданских зданиях на здоровье человека трудно переоценить [1-3]. В зависимости от ритма жизни количество времени, проведенное человеком непосредственно в жилых помещениях, может значительно различаться, но что точно не вызывает сомнений: основные показатели микроклимата (температура внутреннего воздуха, относительная влажность и подвижность воздуха) должны соответствовать условиями комфортности и соответствовать требованиям ГОСТ 30494-2011 (Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях) [4]. Качество воздуха в зданиях определяется различными факторами, в том числе: решениями по организации воздухообмена и системам вентиляции помещений, качество наружного воздуха, источники теплоты, влаги и газовыделений и т. п. [5-8].

Строительные материалы, часто используемые для внутренней отделки (например, краска, обои, клей и т.п.), а также мебель и фурнитура безопасны при соблюдении установленных норм воздухообмена [3]. В противном случае начинается выделение в воздух помещения опасных в высоких концентрациях химических веществ [9].

В настоящее время вопросы организации воздухообмена в жилых зданиях [10], а значит и принятие инженерных решений по системам вентиляции подчеркивают не только проблемы повышения энергоэффективности зданий и сооружений [11-13], но в первую очередь – поддержания воздушно-теплового комфорта помещений [14].

Традиционно в многоквартирных домах до сих пор чаще всего применяется гравитационная (или естественная) система вентиляции [10], основным преимуществом которой является малая стоимость организации. Это самый бюджетный способ, поскольку для ее работы практически ничего не требуется. Наружный воздух поступает через неплотности окон или организованные устройства в оконных рамах (или реже наружных стенах) за счет создаваемой естественным образом разницы давлений воздуха внутри и снаружи помещения, а отработанный воздух выходит через вертикальные вытяжные вентиляционные каналы, расположенные непосредственно в зонах его наибольшего загрязнения – кухонь

и гигиенических помещений [12]. Однако такая система очень зависима от следующих факторов: разницы температуры внутри и снаружи здания, герметичности современных оконных блоков, чистоты и площади живого сечения вентиляционных каналов и, конечно, ветровой нагрузки на здание. В большинстве случаев не поддержания вышеперечисленных условий система не работает практически в течении всего периода года. Следовательно, воздух будет застаиваться, что в итоге повлияет на самочувствие людей и в долгосрочной перспективе приведет к хроническим заболеваниям органов дыхания. В зимнее время года при работе естественной вентиляции создаются условия для снижения энергоэффективности здания [14].

Современное разнообразие планировок жилищного фонда создает дополнительные задачи по определению наилучшей схемы организации системы вентиляции в помещениях квартир: от ситуации небольшой квартиры-студии, в которой пространство кухни неотделимо от жилой зоны до квартир с просторными кухнями-гостиными, которые чаще всего предусматривают режим одновременного использования, а значит человек находится в этом пространстве продолжительное время. Все это делает идею естественного проветривания в процессе готовки пищи и после него менее состоятельной с точки зрения теплового комфорта на протяжении практически всего года, учитывая климатические особенности РФ. Согласно руководящим нормативным документам СП 54.13330 и СП60.13330 вентиляция может быть также: комбинированной с естественным притоком и удалением воздуха с использованием механического побуждения; с механическим побуждением притока и удаления воздуха, если параметры микроклимата и качество воздуха не могут быть обеспечены вентиляцией с естественным побуждением в течение года или смешанной с частичным использованием систем естественной вентиляции для притока или удаления воздуха, предусматриваемой в периоды года, когда параметры микроклимата и качество воздуха не могут быть обеспечены естественной вентиляцией [15-17].

По заданию на проектирование допускается предусматривать возможность использования кухонных вытяжек со встроенными вентиляторами, однако не допускается подключение индивидуальных кухонных вытяжек и других устройств с встроенным вентилятором к воздуховодам вытяжных систем (включая сборные воздуховоды), обслуживающих также другие квартиры. Такие требования оставляют указанное решение по поддержанию параметров микроклимата в «серой» зоне, потому что вопрос о том, как правильно подключать кухонную вытяжку со встроенным вентилятором остается открытым. Очевидно, что требуется руководящее решение о конструировании дополнительного вертикального короба вытяжной вентиляции, диаметр которого будет значительно меньше, чем сечение шахты естественной вентиляции за счет более высокой скорости движения воздуха [18-20].

Поскольку любые конструктивные решения систем вентиляции не должны допускать перетоков воздуха между квартирами, то на системе должен быть предусмотрен обратный клапан [21, 22]. Существуют различные по типу конструкции обратные клапаны: одностворчатые, двустворчатые и многостворчатые клапаны, а также мембранные клапаны, створки которых под напором воздуха поднимаются строго в одну сторону. Пропустив необходимый объем воздуха, створки возвращаются в исходное положение под силой собственного веса или посредством пружин, не допуская возникновения опрокидывания циркуляции воздуха в само обслуживаемое помещение или помещения на соседних этажах.

Проектировщики систем вентиляции и кондиционирования воздуха используют отечественные стандарты, в которых предлагаются методики расчета минимальной нормы воздухообмена в помещении:

- на основе удельных норм воздухообмена или по нормируемой кратности/ нормируемому удельному расходу (приложение Ж СП 60.13330);
- на основе определения допустимой концентрации загрязняющих веществ или по массе вредных/взрывоопасных веществ (приложение Ж СП 60.13330).

Эффективным способом поддержания воздушного баланса между притоком и вытяжкой является размещение в верхней части оконной рамы или в конструкции наружной стены специального вентиляционного клапана [23-25]. В зимний период, когда окна, как правило, закрыты, эти устройства обеспечивают необходимый приток свежего воздуха в квартиру без превышения уровня шума и переохлаждения помещений.

В жилых комнатах и кухне (кухне-столовой) зданий, оборудованных механической вытяжной вентиляцией, независимо от наличия регулируемых оконных створок, фрамуг, форточек приток воздуха предлагается обеспечить через оконные или стеновые воздушные клапаны с регулируемым открыванием или другие устройства.

Постановка задачи. Объектом исследования является двухкомнатная-квартира с кухней-гостиной 20 м² в жилом доме, расположенном в Московской области. Предмет исследования – закономерности изменения тепловлажностных параметров воздуха в кухне-гостиной в случае работы естественной и принудительной вытяжной вентиляции в расчетных точках, а также время восстановления теплового баланса в помещении (или квартире в целом).

Целью исследования является разработка рекомендаций к проектированию вытяжной вентиляции в жилых зданиях.

Задачами проводимого исследования являлись:

1. Определение основных параметров микроклимата помещения при разных подходах к организации вентиляции в натуральных условиях.
2. Определение соответствия установившихся параметров в разный период времени эксперимента требуемым значениям исходя из нормативов, действующих на территории РФ.

Методы исследования. Общие исходные данные: наличие системы естественной приточной и вытяжной вентиляции в здании. Окна жилых помещений выходят на две противоположные стороны, что создает дополнительные условия для работы естественной вентиляции. Параметры вытяжного отверстия – 150×150 мм с установленной вытяжной решеткой $F_{жс} = 0,014$ м². Размеры зонта над плитой 450×150 мм. Сама исследуемая квартира находится на среднем этаже 18-ти этажного многоквартирного дома. Был воспроизведен процесс подготовки пищи с использованием индукционной плиты.

Для изучения параметров воздушной среды в помещении кухни-гостиной проведено 2 варианта исследований:

- 1 вариант: натурные измерения осуществлялись при работе только естественной вентиляции;
- 2 вариант: натурные измерения осуществлялись при совместной работе естественной вентиляции и кухонного зонта со встроенным регулируемым вентилятором.

Измерения производились в течении одного и того же периода времени днем: полчаса до начала активной фазы эксперимента – определение характерных параметров микроклимата, установившихся в дневное время в помещении; час – активная фаза эксперимента с изготовлением пищи на кухне-гостиной; полчаса после окончания активной фазы – определение параметров микроклимата и темпа их снижения до нормативных показателей.

Для выполнения измерений были использованы логгеры данных температуры и влажности Testo 174 Н, модель которых внесена в Государственный Реестр Средств Измерений РФ под номером 47602-11 и допущена к применению в РФ. Для получения результатов измерения использовано бесплатное программное обеспечение ComSoft Basic. Встроенные сенсоры провели срочные измерения с интервалом 5 минут с допустимой погрешностью 0,5 °С по температуре и 3 % по относительной влажности, что позволило документировать данные в соответствии с основными принципами обеспечения качества. Так же применялся портативный термоанемометр RGK AM-20 для определения скорости воздушного потока на естественной вытяжке и в проеме кухонного зонта.

Обсуждение результатов. Натурные измерения параметров микроклимата осуществлялись в кухне-гостиной, как в основном помещении проводимого эксперимента,

и в жилой комнате с выходом на противоположную сторону горизонта для оценки общего состояния параметров внутреннего воздуха, в холодный период года с регулируемой подачей теплоты от системы отопления. За окном наблюдались одинаковые действительные условия облачности, которые позволили исключить значимые дополнительные теплопопущения за счет солнечной радиации. На рис. 1 изображена схема установки датчиков Testo 174 H в исследуемом помещении.

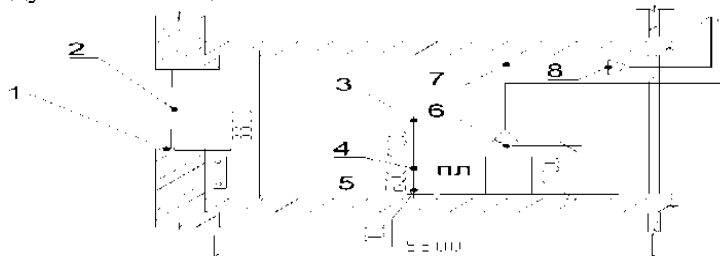


Рис. 1- Схема установки датчиков измерения температуры и влажности:

- 1 – наружный воздух; 2 – воздух у оконного блока; 3, 4, 5 – внутренний воздух в помещении по ГОСТ 30494; 6 – в обслуживаемой зоне над плитой; 7 – в верхней зоне над плитой; 8 – у вытяжной решетки; ПЛ – плита

Fig. 1- Scheme of installation of temperature and humidity measurement sensors:

- 1 – outside air; 2 – air at the window unit; 3, 4, 5 – indoor air according to GOST 30494; 6 – in served zone above the cooker; 7 – in the upper zone above the cooker; 8 – at the exhaust grille

Так же применялся портативный термоанемометр RGK AM-20 для определения скорости воздушного потока на естественной вытяжке и в проеме кухонного зонта. Значения скорости у вытяжной решетки в процессе эксперимента изменялось в диапазоне 1,2-1,6 м/с, что подтверждает работу естественной системы вентиляции.

Расход воздуха можно определить:

$$L = 3600 f v, \text{ м}^3/\text{ч}, \quad (1)$$

где f – живое сечение на проходе воздуха, м^2 ; v – скорость воздуха, м/с.

Из формулы (1) следует, что расход воздуха менялся в диапазоне 60-80 $\text{м}^3/\text{ч}$, однако нельзя исключать возможность того, что кратковременно мог наблюдаться выход за пределы расчетного диапазона. Параметры внутреннего воздуха в соответствии с ГОСТ 30494-2011 «Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях» должны соответствовать: в холодный период года оптимальная температура внутреннего воздуха для жилой комнаты $t_{\text{вн.в}}^{\text{опт}} = 20 - 22 \text{ } ^\circ\text{C}$, допустимая температура – $t_{\text{вн.в}}^{\text{доп}} = 18 - 24 \text{ } ^\circ\text{C}$, оптимальная температура внутреннего воздуха для кухни $t_{\text{вн.в}}^{\text{опт}} = 19 - 21 \text{ } ^\circ\text{C}$, допустимая температура – $t_{\text{вн.в}}^{\text{доп}} = 18 - 26 \text{ } ^\circ\text{C}$, относительная влажность воздуха для жилой комнаты оптимальная $\phi = 45-30 \text{ } \%$, допустимая $\phi \leq 60 \text{ } \%$, для кухни значение относительной влажности не нормируется. В теплый период года нормируются только показатели для жилой комнаты: оптимальная температура внутреннего воздуха $t_{\text{вн.в}}^{\text{опт}} = 22 - 25 \text{ } ^\circ\text{C}$, допустимая температура – $t_{\text{вн.в}}^{\text{доп}} = 20 - 28 \text{ } ^\circ\text{C}$, относительная влажность оптимальная $\phi = 60-30 \text{ } \%$, допустимая $\phi \leq 65 \text{ } \%$.

При обеспечении показателей микроклимата в различных точках обслуживаемой зоны допускается перепад температуры воздуха не более $2 \text{ } ^\circ\text{C}$ для оптимальных показателей и $3 \text{ } ^\circ\text{C}$ – для допустимых, изменение относительной влажности воздуха – не более $7 \text{ } \%$ для оптимальных показателей и $15 \text{ } \%$ – для допустимых. Измерение температуры, влажности и скорости движения воздуха следует проводить в обслуживаемой зоне на высоте 0,1; 0,6 и 1,7 м от поверхности пола – при пребывании людей в помещении преимущественно в сидячем положении или 0,1; 1,1 и 1,7 м от поверхности пола – в помещениях, где люди преимущественно стоят или ходят; в центре обслуживаемой зоны согласно требованиям ГОСТ 30494-2011. Регистрация показателей микроклимата выполнена с интервалом не менее 5 минут в течение 2 ч. Существенного колебания параметров воздуха в жилой комнате в ходе эксперимента не было выявлено: температура воздуха менялась в диапазоне $23,1-24,6 \text{ } ^\circ\text{C}$, относительная влажность – в диапазоне $38,7-50,3 \text{ } \%$, что укладывается в допустимый диапазон.



Рис. 2 - Параметры наружного воздуха (температура и относительная влажность) при проведении эксперимента:

1 – 1 вариант эксперимента при естественной вентиляции;

2 – 2 вариант эксперимента с применением вытяжного зонта

Fig. 2-Outdoor air parameters (temperature and relative humidity) during the experiment:

1 – 1 variant of the experiment with natural ventilation; 2 – 2 variant of the experiment with the use of an exhaust ventilation hood

Рис. 4 содержит информацию о параметрах наружного воздуха, но общий характер графиков не дает очевидных ответов о влиянии столь незначительных колебаний на параметры воздуха внутри при двух рассматриваемых вариантах исследования.

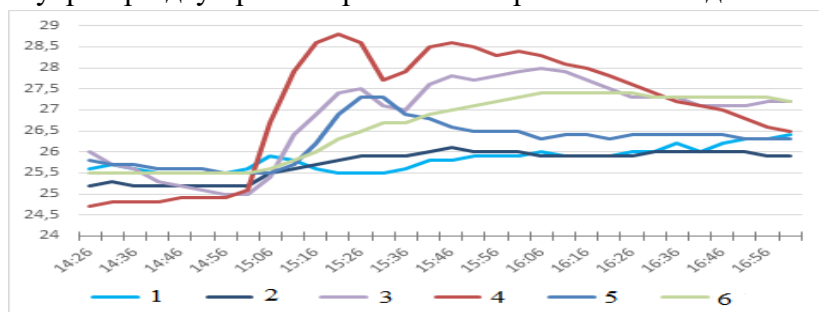


Рис. 3 - Изменение температуры воздуха:

1 – вытяжной воздух 2 вариант; 2 – вытяжной воздух 1 вариант;

3 – в обслуживаемой зоне над плитой 2 вариант, 4 – в обслуживаемой зоне над плитой 1 вариант,

5 – верхняя зона над плитой 2 вариант; 6 – верхняя зона над плитой 12 вариант

Fig. 3 - Air temperature changes:

1 – exhaust air 1 variant; 2 – exhaust air 2 variant; 3 – in the served area above the cooker 1 variant,

4 – in the served area above the cooker 2 variant, 5 – upper area above the cooker 1 variant;

6 – upper area above the cooker 2 variant

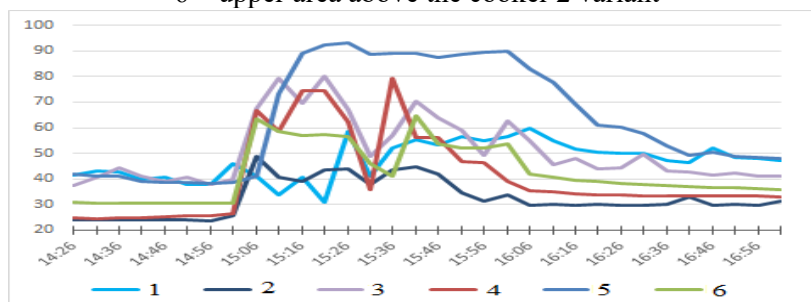


Рис. 4 - Изменение относительной влажности воздуха:

1 – вытяжной воздух 1 вариант; 2 – вытяжной воздух 2 вариант;

3 – в обслуживаемой зоне над плитой 1 вариант, 4 – в обслуживаемой зоне над плитой 2 вариант,

5 – верхняя зона над плитой 1 вариант; 6 – верхняя зона над плитой 2 вариант

Fig. 4 - Changes in relative humidity:

1 – exhaust air 1 variant; 2 – exhaust air 2 variant; 3 – in the served area above the cooker 1 variant,

4 – in the served area above the cooker 2 variant, 5 – upper area above the cooker 1 variant;

6 – upper area above the cooker 2 variant

Рис. 3 характеризует изменение температуры в точках измерения 6, 7, 8 и показывает, что применение вытяжки над плитой дает устойчивое снижение температуры во всех точках

на 1-1,5 °С, а согласно рис. 4 относительная влажность в рабочей зоне у плиты снижается на 10-20 %, в верхней зоне и у вытяжки – до 30 %.

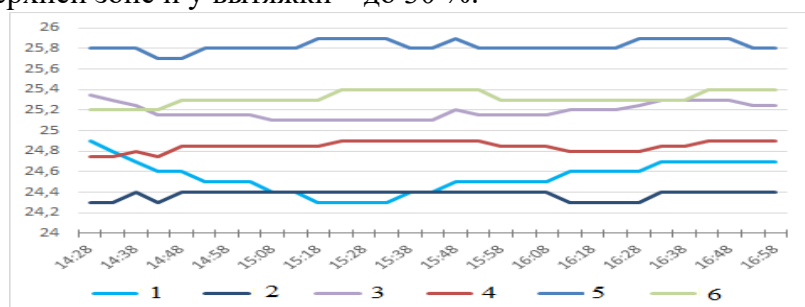


Рис. 5 - Температура внутреннего воздуха, определенная по методике ГОСТ 30494:

1 – 1 вариант на 0,1 м от пола; 2 – 2 вариант на 0,1 м от пола; 3 – 1 вариант на 0,6 м от пола, 4 – 2 вариант на 0,6 м от пола, 5 – 1 вариант на 1,7 м от пола; 6 – 2 вариант на 1,7 м от пола

Fig. 5 - Internal air temperature determined according to GOST 30494:

1 – 1 variant at 0.1 m from the floor; 2 – 2 variant at 0.1 m from the floor; 3 – 1 variant at 0.6 m from the floor, 4 – 2 variant at 0.6 m from the floor, 5 – 1 variant at 1.7 m from the floor; 6 – 2 variant at 1.7 m from the floor

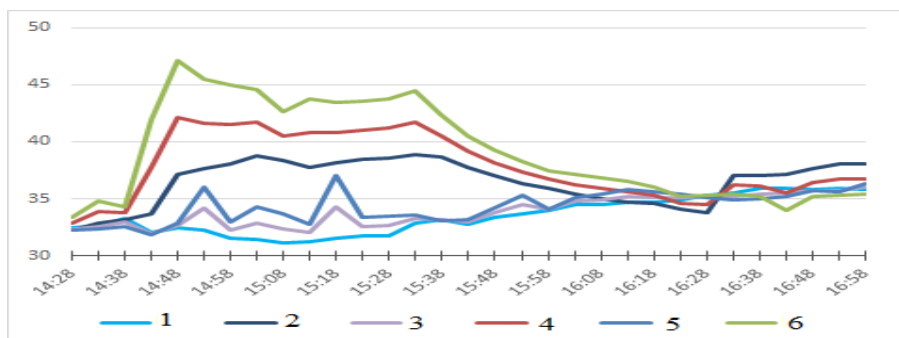


Рис. 6 - Относительная влажность внутреннего воздуха, определенная по ГОСТ 30494:

1 – 1 вариант на 0,1 м от пола; 2 – 2 вариант на 0,1 м от пола; 3 – 1 вариант на 0,6 м от пола, 4 – 2 вариант на 0,6 м от пола, 5 – 1 вариант на 1,7 м от пола; 6 – 2 вариант на 1,7 м от пола

Fig. 6 - Relative humidity of the internal air determined according to GOST 30494:

1 – 1 variant at 0.1 m from the floor; 2 – 2 variant at 0.1 m from the floor; 3 – 1 variant at 0.6 m from the floor, 4 – 2 variant at 0.6 m from the floor, 5 – 1 variant at 1.7 m from the floor; 6 – 2 variant at 1.7 m from the floor

Рис. 5 показывает характер изменения температуры внутреннего воздуха, определяемой по методике, приведенной в ГОСТ 30494-2011.

Влияние способа организации вытяжной вентиляции наиболее очевидно с увеличением высоты, на которой были определены значения: температура при 1 варианте превышает температуру при 2 варианте на 0,6 °С. При обоих вариантах температуры держаться в пределах допустимого диапазона.

Согласно рис. 6 относительная влажность не превысила 50 %, однако наблюдалась конденсация водяных паров на поверхности стен и мебели при 1 варианте вентиляции.

В обоих вариантах требуется дополнительно усовершенствовать организацию приточного воздуха и провести дополнительные исследования, а также провести эксперименты в различные периоды года.

Вывод. Применение современных герметичных окон обеспечивает повышение энергоэффективности оболочки здания, однако приводит к нарушению естественного воздухообмена в жилых помещениях, что в свою очередь вызывает повышение количества вредных веществ в воздухе, включая теплоту и влагу, возникающие в результате жизнедеятельности людей. Для достижения оптимальных показателей микроклимата в помещениях необходима более эффективная система вентиляции.

Правильное конструирование вытяжной системы над кухонной плитой с помощью зонта и встроенного вентилятора помогает избежать конденсации влаги на поверхностях, а также улучшить показатели микроклимата в обслуживаемой зоне

Эффективность функционирования вытяжной вентиляции существенно зависит от точного выбора расчетных точек контроля микроклиматических параметров в помещении, что подтверждает необходимость их предварительного моделирования и оптимизации на этапе проектирования инженерных систем.

Сравнительный анализ режимов естественной и принудительной вентиляции выявил значительное преимущество последних в обеспечении стабильности тепловлажностного режима, свидетельствующее о целесообразности интеграции активных систем вытяжной вентиляции в существующие стандарты проектирования жилых зданий.

Необходимо провести дальнейшие исследования в различные периоды года для разработки дополнительных рекомендаций к проектированию вытяжной вентиляции в жилых зданиях с учетом изменчивости параметров наружного воздуха.

Библиографический список:

1. <https://doi.org/10.34910/MCE.121.1>. Korniyenko S.V., Dubov I.A., Nazarov K.R. Field study of thermal comfort in dwelling during the winter, mid-season and summer. Magazine of Civil Engineering. 2023. 121(5); 12101.
2. Киреев А. Вентиляция в многоквартирных домах: проблемы и перспективы. Журнал СОК. 2022. № 6. С. 66-68.
3. Иванова Е.В., Маркова О.Л., Кирьянова М.Н. Особенности формирования воздушной среды в современных жилых зданиях. Здоровье населения и среда обитания. 2019. № 10 (319). С. 50–53. DOI: <http://doi.org/10.35627/2219-5238/2019-319-10-50-53>.
4. Бодров М.В., Кузин В.Ю. Анализ режимов работы систем естественной вентиляции многоквартирных жилых домов в теплый период года. Приволжский научный журнал. 2016. № 4. С. 26–32.
5. Бусахин А.В. Вентиляция многоквартирных жилых домов. Проблемы и решения. АВОК. 2016. № 3. С. 21–25.
6. Волов Г.Я. Устойчивость работы систем естественной вентиляции многоквартирных жилых зданий. АВОК. 2014. № 1. С. 30–39.
7. Максимова А.Ю., Саенко И.А. Анализ и пути решения проблем системы воздухообмена жилых помещений. Международный технико-экономический журнал. 2015. № 1. С. 101–106.
8. Тюрин Н.П., Лапин Е.П., Титов Г.И., Захарова Ю.Э. Исследование работы вытяжных вентиляционных систем в жилых зданиях. Материалы 70-й юбилейной Всероссийской научно-технической конференции по итогам НИР 2013 года. Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. 2013. С. 267–271.
9. Кирьянова М.Н., Маркова О.Л., Иванова Е.В. Актуальные вопросы качества воздушной среды офисных помещений. Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием: «Профилактическая медицина-2017», 6–7 декабря 2017 г. 2017. Часть 2. С. 9–14.
10. Шонина Н. А. Вентиляция для многоэтажных жилых зданий. АВОК. 2013. № 6. С. 22-30
11. Краснобаев М.А., Суханов М.А. Вентиляция жилых многоквартирных домов с помощью приточных клапанов. Вестник магистратуры. 2022. № 4-4 (127). С. 27-29.
12. Шилкин Н. В., Шонина Н. А., Миллер Ю. В. Галуша А. Н. Гибридная вентиляция в многоэтажных жилых домах: варианты решения. АВОК. 2018. № 5. С. 12-18
13. Шилкин Н. В., Шонина Н. А., Миллер Ю. В. Галуша А. Н. Оценка времени работы регулируемой вентиляции в жилых зданиях. АВОК. 2018. № 3. С. 28-33.
14. Шилкин Н. В., Шонина Н. А., Миллер Ю. В. Возможности энергосбережения в системах с регулируемой естественной вентиляцией. Энергосбережение. 2018. № 2. С. 16-23.
15. Liu H., Ma E. An explainable evaluation model for building thermal comfort in China. Buildings. 2023. 13(12); 3107. <https://doi.org/10.3390/buildings13123107>
16. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.680.459>. Vuksanovic D., Murgul V., Vatin N., Pukhkal V. Optimization of microclimate in residential buildings. Applied Mechanics and Materials. 2014. Vol. 680. Pp. 459-466.
17. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201821202009>. Bezdenezhnukh T., Kuritsyn A., Gimelshtein I. Energy efficiency in civil engineering: analyzing world experience. MATEC Web of Conferences. 2018. 212; 02009.
18. Stopps, Helen and Lozinsky, Cara and Touchie, Marianne. Data-driven modelling of pressurized corridor ventilation system performance in a multi-unit residential building. Journal of Building Physics. 2025. <https://doi.org/10.1177/17442591251317727>

19. Mendoza, Jeric and Lantigua, Maricel. A Study on the Application of Integrated Ventilation Strategies Based on Wind Simulation and Solar Radiation Analysis in Low-Rise Residential Buildings in Manila. *Studies in Art and Architecture*. 2025. 4. 19-27. <https://doi.org/10.56397/SAA.2025.04.03>
20. Motuzienė, Violeta and Bielskus, Jonas and Džiugaitė-Tumėnienė, Rasa and Raudonis, Vidas. Occupancy-Based Predictive AI-Driven Ventilation Control for Energy Savings in Office Buildings. *Sustainability*. 2025. 17. 4140. <https://doi.org/10.3390/su17094140>
21. Kang, Kyungmo and Kim, Daeung. Thermal Comfort Assessment for Simultaneous Operation of Cooling and an Energy Recovery Ventilator in a Residential Building During Summer. *Buildings*. 2025. 15. 582. <https://doi.org/10.3390/buildings15040582>
22. Wang, Xinlin and Mahdavi, Nariman and Sethuvenkatraman, Subbu and West, Sam. An environment-adaptive SAC-based HVAC control of single-zone residential and office buildings. *Data-Centric Engineering*. 2025. 6. <https://doi.org/10.1017/dce.2024.57>
23. Li, Bo and Yue, Wei and Tariku, Fitsum. Applicability of a Heat Recovery Ventilator Retrofit in a Vancouver Residential House. *Energies*. 2025. 18. 1820. <https://doi.org/10.3390/en18071820>
24. Mortari, Daniela and Wang, Yu and Guyot, Gaelle and Plagmann, Manfred and Mendes, Nathan. Smart ventilation in residential buildings: a systematic review of control strategies and their effectiveness. *Journal of Building Engineering*. 2025. 112584. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2025.112584>
25. Park, Sangin and Kagi, Naoki and Umishio, Wataru and Shinohara, Naohide and Kim, Hoon. Influence of mechanical ventilation systems on indoor VOC concentrations in residential buildings. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*. 2025. 1-21. <https://doi.org/10.1080/13467581.2025.2467246>

References:

1. <https://doi.org/10.34910/MCE.121.1>. Korniyenko S.V., Dubov I.A., Nazarov K.R. Field study of thermal comfort in dwelling during the winter, mid-season and summer. *Magazine of Civil Engineering*. 2023. 121(5); 12101. (In Russ.)
2. Kireev A. Ventilation in apartment buildings: problems and prospects. *SOK Journal*. 2022;6:66-68. (In Russ.)
3. Ivanova E.V., Markova O.L., Kir'yanova M.N. Peculiarities of air environment formation in modern residential buildings. *Zdorov'e naseleniya i sreda obitaniya*. 2019;10(319):50-53. (In Russ.) DOI: <http://doi.org/10.35627/2219-5238/2019-319-10-50-53>.
4. Bodrov M.V., Kuzin V.Yu. Analysis of modes of operation of natural ventilation systems of apartment buildings in the warm period of the year. *Privolzhskiy nauchnyi zhurnal*. 2016;4:26-32. (In Russ.)
5. Busakhin A.V. Ventilation of apartment blocks. Problems and solutions. *AVOK*. 2016;3:21-25. (In Russ.)
6. Volov G.Ya. Stability of operation of natural ventilation systems of apartment residential buildings. *AVOK*. 2014; 1:30-39. (In Russ.)
7. Maksimova A.Yu., Saenko I.A. Analyse and ways of solving the problems of air exchange system of residential premises. *International technical and economic journal*. 2015;1:101-106. (In Russ.)
8. Tyurin N.P., Lapin E.P., Titov G.I., Zakharova Y.E. Investigation of exhaust ventilation systems in residential buildings. *Materials of the 70th Anniversary All-Russian Scientific and Technical Conference on the results of research and development in 2013. Traditions and innovations in construction and architecture*. 2013: 267-271. (In Russ.)
9. Kiryanova M.N., Markova O.L., Ivanova E.V. Topical issues of the quality of the air environment of office premises. *Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation: 'Preventive Medicine-2017', 6-7 December 2017*. 2017; 2: 9-14. (In Russ.)
10. Shonina N.A. Ventilation for multi-storey residential buildings. *AVOK*. 2013;6:22-30 (In Russ.)
11. Krasnobayev M.A., Sukhanov M.A. Ventilation of residential apartment buildings with the help of supply valves. *Bulletin of magistracy*. 2022; 4-4 (127): 27-29. (In Russ.)
12. Shilkin N.V.V., Shonina N.A., Miller Y.V. Galusha A.N. Hybrid ventilation in multi-storey residential buildings: variants of decision. *AVOK*. 2018; 5:12-18 (In Russ.)
13. Shilkin N.V.V., Shonina N.A., Miller Y.V. Galusha A.N. Estimation of operation time of regulated ventilation in residential buildings. *AVOK*. 2018;3:28-33. (In Russ.)
14. Shilkin N.V.V., Shonina N.A., Miller Yu.V. Opportunities of energy saving in systems with regulated natural ventilation. *Energobezrezhenie*. 2018;2:16-23. <http://doi.org/10.35627/2219-5238/2019-319-10-50-53/> (In Russ.)
15. Liu H., Ma E. An explainable evaluation model for building thermal comfort in China. *Buildings*. 2023. 13(12); 3107. <https://doi.org/10.3390/buildings13123107>
16. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.680.459>. Vuksanovic D., Murgul V., Vatin N., Pukhkal V. Optimization of microclimate in residential buildings. *Applied Mechanics and Materials*. 2014;680:59-466.
17. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201821202009>. Bezdenezhnikh T., Kuritsyn A., Gimelshtein I. Energy efficiency in civil engineering: analyzing world experience. *MATEC Web of Conferences*. 2018. 212; 02009.
18. Stopps, Helen and Lozinsky, Cara and Touchie, Marianne. Data-driven modelling of pressurized corridor ventilation system performance in a multi-unit residential building. *Journal of Building Physics*. 2025. <https://doi.org/10.1177/17442591251317727>

19. Mendoza, Jeric and Lantigua, Maricel. A Study on the Application of Integrated Ventilation Strategies Based on Wind Simulation and Solar Radiation Analysis in Low-Rise Residential Buildings in Manila. *Studies in Art and Architecture*. 2025;4:19-27. <https://doi.org/10.56397/SAA.2025.04.03>
20. Motuzienė, Violeta and Bielskus, Jonas and Džiugaitė-Tumėnienė, Rasa and Raudonis, Vidas. Occupancy-Based Predictive AI-Driven Ventilation Control for Energy Savings in Office Buildings. *Sustainability*. 2025;17:4140. <https://doi.org/10.3390/su17094140>
21. Kang, Kyungmo and Kim, Daeung. Thermal Comfort Assessment for Simultaneous Operation of Cooling and an Energy Recovery Ventilator in a Residential Building During Summer. *Buildings*. 2025;15:582. <https://doi.org/10.3390/buildings15040582>
22. Wang, Xinlin and Mahdavi, Nariman and Sethuvenkatraman, Subbu and West, Sam. An environment-adaptive SAC-based HVAC control of single-zone residential and office buildings. *Data-Centric Engineering*. 2025. 6. <https://doi.org/10.1017/dce.2024.57>
23. Li, Bo and Yue, Wei and Tariku, Fitsum. Applicability of a Heat Recovery Ventilator Retrofit in a Vancouver Residential House. *Energies*. 2025. 18. 1820. <https://doi.org/10.3390/en18071820>
24. Mortari, Daniela and Wang, Yu and Guyot, Gaelle and Plagmann, Manfred and Mendes, Nathan. Smart ventilation in residential buildings: a systematic review of control strategies and their effectiveness. *Journal of Building Engineering*. 2025. 112584. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2025.112584>
25. Park, Sangin and Kagi, Naoki and Umishio, Wataru and Shinohara, Naohide and Kim, Hoon. Influence of mechanical ventilation systems on indoor VOC concentrations in residential buildings. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*. 2025;1-21. <https://doi.org/10.1080/13467581.2025.2467246>

Сведения об авторах:

Ольга Юрьевна Маликова, кандидат технических наук, доцент, доцент, кафедра Теплогазоснабжения и вентиляции; KryuchkovaOU@mgsu.ru; ORCID 0000-0003-0703-8135

Денис Федорович Карпов, старший преподаватель, кафедра теплогазоснабжения; karpovdf@vogu35.ru; ORCID 0000-0002-3522-9302

Татьяна Владимировна Сазонова, старший преподаватель, кафедра начертательной геометрии и инженерной графики; ingraf@spbgasu.ru; tatyana10zaikina@yandex.ru

Information about authors:

Olga Y. Malikova, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Assoc. Prof., Department of Heat and Gas Supply and Ventilation; KryuchkovaOU@mgsu.ru; ORCID 0000-0003-0703-8135

Denis F. Karpov, Senior Lecturer, Department of Heat, Gas and Water Supply; karpovdf@vogu35.ru; ORCID 0000-0002-3522-9302

Tatiana V. Sazonova, Senior Lecturer, Department of Descriptive Geometry and Engineering Graphics; ingraf@spbgasu.ru; tatyana10zaikina@yandex.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов/The authors declare that there are no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 11.05.2025

Одобрена после рецензирования/Reviced 01.06.2025

Принята в печать/Accepted for publication 15.06.2025.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 624.04

DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-2-211-219



Оригинальная статья /Original article

**Решение динамической задачи о воздействии подвижной массивной нагрузки
на конструкцию прямыми методами**

Л.Н. Панасюк¹, А.А. Фириченко¹, А.Д. Мерзлякова², В.С. Тюрина¹

¹Донской государственный технический университет,

¹344002, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина 1, Россия,

² Российский университет транспорта (МИИТ),

²127994, ГСП-4, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9, Россия

Рез.ме. Цель. В статье представлено моделирование динамических процессов в зданиях и сооружениях. Рассмотрена общая постановка динамической задачи о движении массивной нагрузки по массивному сооружению. **Метод.** Уравнение движения получено в форме метода конечных элементов. Решение уравнений выполняется с использованием прямых методов интегрирования задач динамики. Построены абсолютно устойчивые схемы прямого интегрирования, в которых система разрешающих уравнений тривиальная – матрица системы диагональная. Трудоемкость на шаге по времени такая же невысокая, как в явных схемах. Предлагаемые методы можно рассматривать как явные абсолютно устойчивые схемы прямого интегрирования динамической задачи с переменной во времени массой. Даны рекомендации по оценке точности численного решения. Рассмотрена задача движения массивного груза по массивному строению. Дискретизация пространственной области выполняется методом конечных элементов. Дискретизация временной области основана на шаговом однослойном процессе. Для построения основных уравнений использован подход, аналогичный тетра-методу Вилсона, примененный на основе вариационного принципа Гэртина. **Результат.** Построены дифференциальные уравнения задачи о движении подвижной массивной нагрузки по произвольному массивному сооружению в форме метода конечных элементов. Приведены численные методы решения уравнений движения с использованием абсолютно устойчивых схем прямого интегрирования. Система разрешающих уравнений может иметь диагональную структуру, что позволяет классифицировать полученные схемы как явные. **Вывод.** Предложенный подход может быть применен к анализу напряженно-деформированного состояния и несущей способности произвольных пролетных строений при движении по ним массивной нагрузки. Учтено влияние скорости нагрузки на напряженно-деформированное состояние конструкции. Ограничений по граничным условиям и видам нагружения нет.

Ключевые слова: динамика сооружений, метод конечных элементов, схема прямого интегрирования, движущаяся массивная нагрузка, спектральный радиус, матрица масс, матрица жесткости, перемещение узлов, скорость, ускорение, шаг интегрирования по времени

Для цитирования: Л.Н. Панасюк, А.А. Фириченко, А.Д. Мерзлякова, В.С. Тюрина. Решение динамической задачи о воздействии подвижной массивной нагрузки на конструкцию прямыми методами. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025;52(2):211-219. DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-2-211-219

**Solution of the dynamic problem of the effect of a mobile massive load
on a structure by direct methods**

L.N. Panasyuk¹, A.A. Firichenko¹, A.D. Merzlyakova², V.S. Tyurina¹

¹Don State Technical University,

¹1 Gagarina Square, Rostov-on-Don 344002, Russia

²Russian University of Transport (MIIT),

9 build. 9 Obraztsova St., GSP-4, Moscow, 127994, Russia

Abstract. Objective. The article presents the modeling of dynamic processes in buildings and structures. The general formulation of the dynamic problem of the motion of a massive load along a massive structure is considered. **Method.** The equation of motion is obtained in the form of the finite element method. The equations are solved using direct methods of integrating dynamics problems. Absolutely stable direct integration schemes are constructed, in which the system of resolving equations is trivial - the matrix of the system is diagonal. The complexity at the time step is as low as in explicit schemes. The proposed methods can be considered as explicit absolutely stable direct integration schemes for a dynamic problem with a time-varying mass. Recommendations are given for assessing the accuracy of the numerical solution. The problem of moving a massive load along a massive structure is considered. Discretization of the spatial domain is performed by the finite element method. Discretization of the time domain is based on a step-by-step single-layer process. An approach similar to Wilson's theta method, applied on the basis of Gartin's variational principle, is used to construct the main equations. **Result.** Differential equations of the problem of the motion of a moving massive load on an arbitrary massive structure are constructed in the form of the finite element method, and numerical methods for solving the equations of motion using absolutely stable direct integration schemes are presented. The system of resolving equations can have a diagonal structure, which allows classifying the obtained schemes as explicit. **Conclusion.** The proposed approach can be applied to the analysis of the stress-strain state and bearing capacity of arbitrary spans when a massive load moves along them. The effect of the load velocity on the stress-strain state of the structure is taken into account. There are no restrictions on boundary conditions and types of loading.

Keywords: structural dynamics, finite element method, direct integration scheme, moving mass load, spectral radius, mass matrix, stiffness matrix, node displacement, velocity, acceleration, and time integration step

For citation: L.N. Panasyuk, A.A. Firichenko, A.D. Merzlyakova, V.S. Tyurina. Solution of the dynamic problem of the effect of a mobile massive load on a structure by direct methods. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2025;52(2):211-219. (In Russ) DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-2-211-219.

Введение. Впервые задача о динамическом воздействии подвижной нагрузки на сооружение была поставлена в начале 20 века в работах Стокса и Бресса. Исчерпывающее решение задачи о движении системы сил, не связанных с массой, дано в работах А.Н. Крылова и С.П. Тимошенко. Показано, что при учете массы груза задача имеет решение в замкнутом виде лишь в предположении о возможности пренебрежения массой сооружения по сравнению с массой нагрузки. В.В. Болотным получены дифференциальные уравнения движения массы груза и сооружения, однако здесь сооружение моделировалось массивной балкой. Даже в этом частном случае сооружения показано, что решение полученных дифференциальных уравнений возможно лишь численными методами [1].

Постановка задачи. В данной работе построены дифференциальные уравнения задачи о движении подвижной массивной нагрузки по произвольному массивному сооружению в форме метода конечных элементов, а также приведены численные методы решения уравнений движения с использованием абсолютно устойчивых схем прямого интегрирования. Система разрешающих уравнений может иметь диагональную структуру, что позволяет классифицировать полученные схемы как явные.

Методы исследования. Рассмотрим уравнения движения массивной нагрузки для неоднородной упругой пространственной области. В пределах объема V_1 движущаяся масса не изменяется во времени, и для бесконечно малого дифференциального элемента среды справедливы стандартные уравнения динамической теории упругости (1), записанные в матричной форме:

$$A\sigma + p = \rho u, \in V_1, t, \quad (1)$$

где $\mathbf{A}$ – матрица операций дифференцирования, $\mathbf{p}$ – вектор объемных сил, $\mathbf{u}$ – вектор перемещений, $\ddot{\mathbf{u}}$ – вектор ускорений, $\boldsymbol{\sigma}$ – вектор напряжений, ρ – плотность материала среды ускорения. Наполнение этих матриц здесь не приведено.

Во всем объеме V справедливы уравнения неразрывности деформаций и закона Гука с обозначениями согласно (1):

$$\begin{aligned}\boldsymbol{\varepsilon} &= \mathbf{A}^T \mathbf{u}, \in V, t \\ \boldsymbol{\sigma} &= \mathbf{D} \boldsymbol{\varepsilon}, \in V, t\end{aligned}\quad (2)$$

На части объема V_2 масса не является стационарной величиной. Происходит постоянное ее изменение за счет перемещающихся со скоростью v_t массивных объектов [2-3]

$$\Delta M(t) = \rho(t) \Delta V = \Delta M_0 + \Delta M_t(t) = \rho_0 \Delta V + \rho_t(t) \Delta V, \in V_2, t \quad (3)$$

Скорость элементарного объема в начале временного промежутка $v = \dot{u}$, в конце $v + dv = \dot{u} + d\dot{u}$. При выводе уравнения движения тела переменной массы можно применить теорему об изменении количества движения к дифференциальному элементу среды. При этом уравнение движения малого элемента объема V_2 будет подчиняться уравнению Мещерского. С учетом постоянной плотности перемещающихся объектов $\rho_0 = \text{const}$ получим уравнение движения элемента с переменной массой:

$$\mathbf{A} \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{p} + (v_t - \dot{u}) \frac{d\rho_t}{dt} = \rho \ddot{u}, \in V_2, t \quad (4)$$

С учетом статических граничных условий на поверхности S_1 , кинематических граничных условий на поверхности S_2 и начальных условий система уравнений динамической теории упругости с переменной массой имеет вид:

$$\left\{ \begin{aligned} \mathbf{A} \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{p} &= \rho \ddot{u}, \in V_1, t \\ \mathbf{A} \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{p} + (v_t - \dot{u}) \frac{d\rho_t}{dt} &= \rho \ddot{u}, \in V_2, t \\ \boldsymbol{\varepsilon} &= \mathbf{A}^T \mathbf{u}, \in V, t \\ \boldsymbol{\sigma} &= \mathbf{D} \boldsymbol{\varepsilon}, \in V, t \\ \mathbf{A}_s \boldsymbol{\sigma} - \mathbf{p}_s &= 0, \in S_1, t \\ \mathbf{u} &= \mathbf{u}_s, \in S_2, t \\ \mathbf{u} &= \mathbf{u}_0, \dot{\mathbf{u}} = \dot{\mathbf{u}}_0, \in V, t = 0 \end{aligned} \right. \quad (5)$$

Скорость движения переменной массы v_t , а также скорость изменения массы $\frac{d\rho_t}{dt} \Delta V$ являются детерминированными функциями времени. Эти функции определяются выбранным режимом движения. Отметим, что первое уравнение (5) является частным случаем второго. Действительно, если во втором уравнении (5) положить $\rho_t = 0$, то получим первое уравнение. Поэтому оба уравнения можно заменить вторым, справедливым во

всем объеме системы:

$$\mathbf{A} \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{p} + (v_t - \dot{u}) \frac{d\rho_t}{dt} = \rho \ddot{u}, \in V_2, t$$

Тогда при задании параметров движущейся нагрузки в объеме V_1 следует положить нулю функцию скорости и массы движущейся нагрузки.

По известной методике Гэртина строим вариационное уравнение типа Лагранжа в свертках для системы с переменной массой. Выполнив *свертку* уравнения равновесия в объеме системы и уравнения статических граничных условий с вариацией перемещений δu , получим интегральное тождество [4]:

$$\int_{(V)} \left(A\sigma + p + (v_t - \dot{u}) \frac{d\rho_t}{dt} - (\rho_0 + \rho_t)u \right) * \delta u dV + \int_{(S_1)} (A_s \sigma - p_s) * \delta u dS = 0 \quad (6)$$

где обозначает операцию свертки двух функций по времени. Преобразовав интеграл по объему по формуле Остроградского-Гаусса, используя формулу интегрирования по частям и учитывая изохронность вариации перемещений $\delta u(0) = \delta u(t) = 0$, получим вариационное уравнение типа Лагранжа движения системы с переменной массой в свертках (7):

$$\begin{aligned} \int_{(V)} \delta(A^T u) * \sigma dV - \int_{(V)} \delta u * p dV - \int_{(S_1)} \delta u * p_s dS - \int_{(V)} \delta u * (v_t - \dot{u}) \rho_t + \\ \frac{1}{2} \int_{(V)} (\rho_0 + \rho_t) \dot{u} * \dot{u} dV = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

Вывод разрешающих уравнений. По известной методике Гэртина строим вариационное уравнение типа Лагранжа в свертках для системы с переменной массой. Выполнив свертку уравнения равновесия в объеме системы и уравнения статических граничных условий с вариацией перемещений δu , получим интегральное тождество:

$$\int_{(V)} \left(A\sigma + p + (v_t - \dot{u}) \frac{d\rho_t}{dt} - (\rho_0 + \rho_t)u \right) * \delta u dV + \int_{(S_1)} (A_s \sigma - p_s) * \delta u dS = 0 \quad (8)$$

где обозначает операцию свертки двух функций по времени. Преобразовав интеграл по объему по формуле Остроградского-Гаусса, используя формулу интегрирования по частям и учитывая изохронность вариации перемещений $\delta u(0) = \delta u(t) = 0$, получим вариационное уравнение типа Лагранжа движения системы с переменной массой в свертках (7):

$$\begin{aligned} \int_{(V)} \delta(A^T u) * \sigma dV - \int_{(V)} \delta u * p dV - \int_{(S_1)} \delta u * p_s dS - \int_{(V)} \delta u * (v_t - \dot{u}) \rho_t + \\ \frac{1}{2} \int_{(V)} (\rho_0 + \rho_t) \dot{u} * \dot{u} dV = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

Уравнения движения в форме метода конечных элементов строим известным способом. Для этого вся область разбивается на ансамбль конечных элементов. В пределах каждого конечного элемента проводится аппроксимация вектор-функции перемещений через перемещения узлов конечного элемента: $u = \varphi q$, где φ - матрица координатных функций конечного элемента, зависящая только от пространственных координат [5]. Деформации определяют через узловые перемещения по формуле: $\varepsilon = A^T u = A^T \varphi q = \Phi q$, где $\Phi = A^T \varphi$. После исключения напряжений по формуле $\sigma = D\varepsilon = D\Phi q$, имеем уравнение движения одного i -го конечного элемента с учетом движущейся массы (10):

$$\begin{cases} (M_i + M_{it}) \ddot{q}_i + C_i \dot{q}_i + K_i q_i + \dot{M}_{it} (q_i - q_{it}) = P_{i0} + P_{it}(t), \\ \text{при } t=0 \quad q_i = q_{i0}, \quad \dot{q}_i = \dot{q}_{i0} \\ M_i = \int_{(V)} \rho_0 \varphi^T \varphi dV - \text{матрица масс конечного элемента,} \\ K_i = \int_{(V)} \Phi^T D \Phi dV - \text{матрица жесткости конечного элемента} \end{cases} \quad (10)$$

Для ансамбля конечных элементов, моделирующего расчетную область, уравнения движения строятся известным приемом «поэлементного» суммирования. Окончательно уравнение движения ансамбля конечных элементов с учетом движущейся массы записано в (11):

$$\begin{cases} (M + M_t) \ddot{q} + C \dot{q} + K q + \dot{M}_t (q - q_t) = P_0 + P_t(t), \\ \text{при } t=0 \quad q = q_0, \quad \dot{q} = \dot{q}_0 \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} q = q(t) - \text{вектор-функция узловых перемещений,} \\ P = P(t) - \text{вектор-функция внешней нагрузки,} \\ M = \sum M_i - \text{глобальная матрица масс ансамбля элементов,} \\ C = \sum C_i - \text{глобальная матрица демпфирования (вязкости) системы,} \\ K = \sum K_i - \text{глобальная матрица жесткости ансамбля элементов} \end{cases}$$

Для построения *явной устойчивой* схемы прямого интегрирования уравнения (11) использован общий прием, предложенный в работах Л.Н.Панасюка. Преобразуем полудискретную сеточную систему уравнений (11), используя представление:

$$\begin{cases} C = C_1 + C_2, \\ K = K_1 + K_2 \end{cases} \quad (12)$$

В (12) C_1, K_1 – диагональные положительно определенные матрицы, в которых элементы на главной диагонали не превышают соответствующих в матрицах демпфирования и жесткости. Преобразуем (11) с учетом (12) и выполним операцию свертки полученного уравнения с некоторой непрерывной функцией $g(t)$:

$$\begin{aligned} g(t) * [(M + M_t)\ddot{q} + C_1\dot{q} + K_1q + M_t(\dot{q} - \dot{q}_t)] = \\ = g(t) * [P_0 + P_t(t) - C_2\dot{q} + K_2q] \end{aligned} \quad (13)$$

Методика расчета и абсолютная устойчивость схемы. При аппроксимации искомой вектор-функции узловых перемещений в пределах малого временного отрезка Δt считаем, что левая часть уравнения (13) содержит функцию с неопределенными параметрами: $q \approx q_1(q_n, q_{n+1}, q_n)$, а параметры в правой части известны с предыдущих шагов: $q \approx q_2(q_n, q_n)$. Подобную аппроксимацию можно выполнить разными способами.

Использование каждого из них порождают различные варианты явной схемы прямого интегрирования. Например, вектор-функции q_1 и q_2 представим в виде:

$$\begin{cases} q_1 = q_n + \dot{q}_n\tau + (q_{n+1} - q_n - s_n)\frac{\tau^2}{\Delta t^2}, \quad \tau \in [0, \Delta t], \quad s = q\Delta t \\ q_2 = q_n + \dot{q}_n\tau \end{cases} \quad (14)$$

В (14) и далее нижние индексы n и $n+1$ означают номер итерации по времени. Примем, что в пределах малого временного шага вектор-функцию нагрузки и матрицу движущейся массы можно приблизить линейными функциями:

$$\begin{cases} P(\tau) \approx \left(1 - \frac{\tau}{\Delta t}\right)P_n + \frac{\tau}{\Delta t}P_{n+1}, \\ M_t(\tau) \approx \left(1 - \frac{\tau}{\Delta t}\right)M_n + \frac{\tau}{\Delta t}M_{n+1} \end{cases} \quad (15)$$

После подстановки (15), (14) в (13) и вычисления свертки со степенной функцией $g=\tau^m$, получим:

$$\begin{aligned} & \left[\frac{m!t^{m+1}}{(m+1)!} \cdot \frac{2}{\Delta t^2} M(q_{n+1} - q_n - s_n) + \right. \\ & C_1 \cdot \left[\frac{m!t^{m+1}}{(m+1)!} \dot{q}_n + \frac{2m!}{(m+2)!} \cdot \frac{t^{m+2}}{\Delta t^2} \cdot (q_{n+1} - q_n - s_n) \right] + \\ & \left. \frac{m!t^{m+1}}{(m+1)!} (C - C_1) \dot{q}_n + \frac{2m!}{(m+2)!} \cdot \frac{t^{m+2}}{\Delta t^2} K_1 \cdot (q_{n+1} - q_n - s_n) + \right. \\ & K \cdot \left[\frac{m!t^{m+1}}{(m+1)!} \cdot \dot{q}_n + \frac{m!}{(m+2)!} \cdot \frac{t^{m+2}}{1} \dot{q}_n \right] - \\ & \left. \left[\frac{m!t^{m+1}}{(m+1)!} - \frac{m!}{(m+2)!} \cdot \frac{t^{m+2}}{\Delta t} \right] P_n - \frac{m!}{(m+2)!} \cdot \frac{t^{m+2}}{\Delta t} P_{n+1} = 0 \right. \end{aligned} \quad (16)$$

Если равенство (16) удовлетворить дискретно в точке $\Theta\Delta t$, то после сокращения на $\Delta t^{m-1}\Theta^m$, получим систему уравнений с диагональной матрицей относительно неизвестного вектора q_{n+1} . Входящий в уравнение неопределенный параметр Θ следует назначать из соображений абсолютной устойчивости шагового вычислительного процесса. Достаточным условием устойчивости схемы является спектральная устойчивость по Дж.Нейману, обеспечивающая непрерывность решения по начальным данным [6-8].

Определяем значение Θ при $\Delta t \rightarrow \infty$, что обеспечивает устойчивость схемы для произвольно большого отношения шага интегрирования к периодам собственных форм колебаний. После предельного перехода имеем:

$$\frac{2\Theta^2}{(m+2)(m+3)} \cdot K_1 q_{n+1} = \left(\frac{2\Theta^2}{(m+2)(m+3)} \cdot K_1 - K \right) q_n + \left(\frac{2\Theta^2}{(m+2)(m+3)} \cdot K_1 - \frac{\Theta}{m+2} K \right) s_n \quad (17)$$

$$\Theta = \frac{m+3}{2} \lambda_i$$

Можно показать, что устойчивость обеспечена при исследовании спектрального радиуса системы (17) после разложения последней по собственным векторам матрицы $K_1^{-1}K$ можно свести к анализу спектрального радиуса матрицы второго порядка:

$$\begin{bmatrix} 1 - \frac{2}{\lambda_i} \frac{m+2}{m+3} & 0 \\ -\frac{4}{\lambda_i} \frac{m+2}{m+3} & -1 \end{bmatrix}$$

λ_i обозначает i -е собственное число матрицы.

При этом собственные числа матрицы $\mu_1 = -1$, $\mu_2 = 1 - \frac{2}{\lambda_i} \cdot \frac{m+2}{m+3}$. Тогда спектральный радиус $\rho = \max(|\mu_1|, |\mu_2|) = 1$.

Для обеспечения устойчивости одновременно по всем формам разложения необходимо назначить Θ по максимальному собственному числу. Окончательно $\Theta = \frac{m+3}{2} \lambda$.

Явная безусловно устойчивая схема прямого интегрирования уравнений движения с переменной массой:

$$\begin{cases} [M_n + M_{n+1} + \Delta t C_D + 0.5\lambda\Delta t^2 K_D] q_{n+1} = \\ [M_n + M_{n+1} + \Delta t C_D + 0.5\lambda\Delta t^2 K_D - \Delta t^2 K] q_n + \\ + [M_n + M_{n+1} + \Delta t C_D - \Delta t C + 0.5\lambda\Delta t^2 K_D - 0.5\Delta t^2 K] s_n + \\ 0.5\Delta t^2 (P_n + P_{n+1}), \\ s_{n+1} = -s_n + 2(q_{n+1} - q_n), s = \dot{q}\Delta t, \lambda = \max\{eig(K_D^{-1}K)\} \end{cases} \quad (18)$$

Система разрешающих уравнений (15) имеет диагональную структуру, допускает тривиальное обращение. Особенности оптимизации алгоритма (15), в данной статье не рассматриваются. Повысить точность схемы интегрирования возможно, используя другой вариант аппроксимации вектор-функции перемещений по времени. Построенная схема названа «схемой с внутренней итерацией»:

$$\begin{cases} [M_n + M_{n+1} + \Delta t C_D + 0.5 \lambda \Delta t^2 K_D] q_{n+1} = \\ [M_n + M_{n+1} + \Delta t C_D + 0.5 \lambda \Delta t^2 K_D + \Delta t^3 (C - C_D) R^{-1} K - \Delta t^2 K + 0.5 \Delta t^4 (K - \lambda K_D) R^{-1} K] q_n + \\ + \left[M_n + M_{n+1} + \Delta t C_D - \Delta t C + 0.5 \lambda \Delta t^2 K_D - \Delta t C - 0.5 \Delta t^2 K + \right. \\ \left. + \Delta t^3 (C - C_D) R^{-1} (1/\Delta t C + 0.5 K) + 0.5 \Delta t^4 (K - \lambda K_D) R^{-1} (1/\Delta t C + 0.5 K) \right] s_n + \\ 0.5 \Delta t^2 (P_n + P_{n+1}), \\ s_{n+1} = -s_n + 2(q_{n+1} - q_n), s = q \Delta t, \lambda = \max \{eig(K_D^{-1} K)\} \end{cases} \quad (19)$$

Обсуждение результатов. Выполнены численные эксперименты и сравнения решений по (15)-(16) с «эталонной» задачей В.В. Болотина. В расчетах варьировались отношение массы груза к массе балки в сегменте $[0.05...0.5]$ и отношение скорости груза к «критической» в таком же сегменте. Решение МКЭ построено при разбиении оси балки на 100 конечных элементов. Локальные матрицы масс и жесткости построены традиционно. Продольная податливость элемента балки не учитывалась (рис.1).

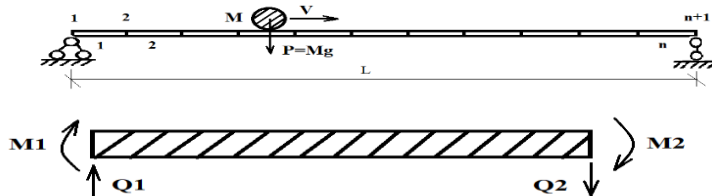


Рис. 1-МКЭ модель балки и степени свободы балочного элемента
Fig. 1 -FEM model of a beam and degrees of freedom of a beam element

Тестируемое решение строилось в комплексе Scilab [9-10]. Отметим, что решения по предлагаемой схеме в большей части области совпадает с уточненным решением уравнений В.В. Болотина (два члена аппроксимации Бубнова-Галеркина). Различия между результатами в эталонном решении и его уточнении при увеличении членов аппроксимации указывают на необходимость учитывать кососимметричные слагаемые в аппроксимации по пространственной оси в методе Бубнова-Галеркина.

Относительная погрешность для большей части результатов между эталонным и тестируемым имеет порядок 0,1% (рис. 2-4). Максимальная погрешность достигается при высоких скоростях движения, но не превышает 3-4%.

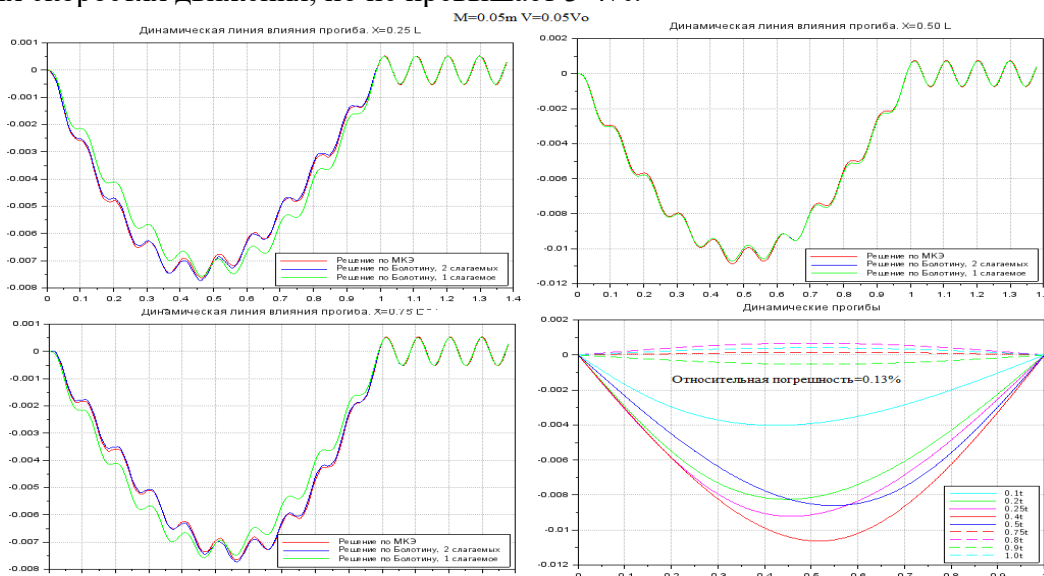


Рис. 2 - Параметры движения: $M=0.05m$, $V=0.05V_0$
Fig. 2 - Movement parameters: $M=0.05m$, $V=0.05V_0$

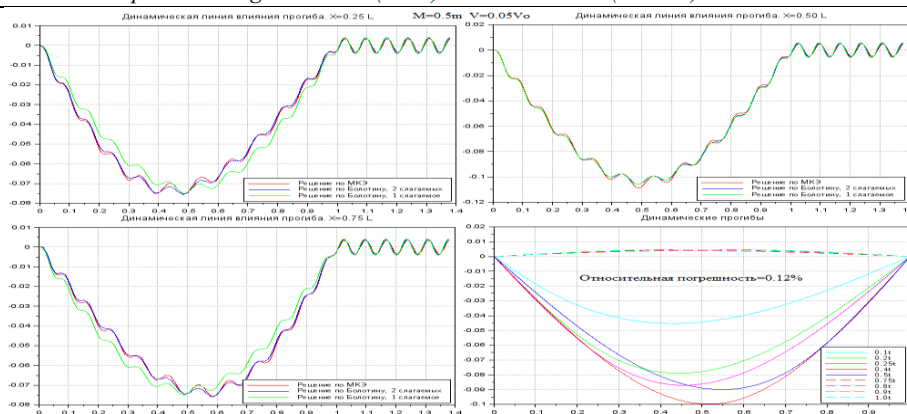


Рис. 3 - Параметры движения: $M=0.5m$, $V=0.05V_0$

Fig. 3 - Movement parameters: $M=0.5m$, $V=0.05V_0$

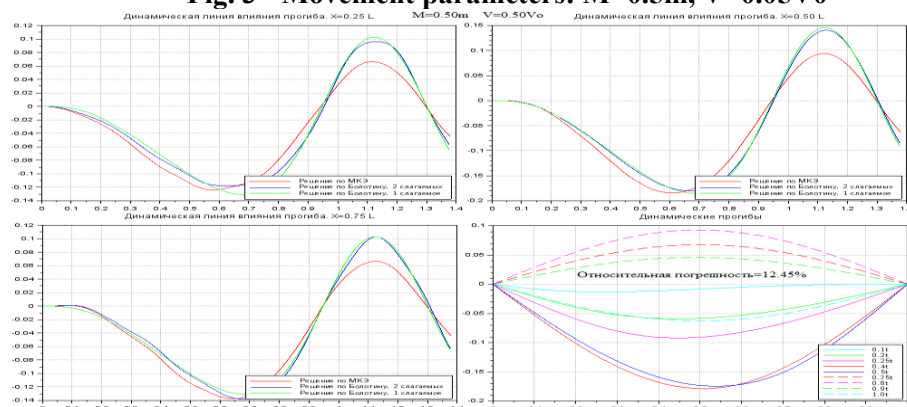


Рис. 4 - Параметры движения: $M=0.50m$, $V=0.50V_0$

Fig. 4 - Movement parameters: $M=0.50m$, $V=0.50V_0$

Расчет был выполнен в программном комплексе SCILAB. На рис. 5 приведена зависимость среднеквадратичного отклонения решения МКЭ с решением В.В.Болотина.

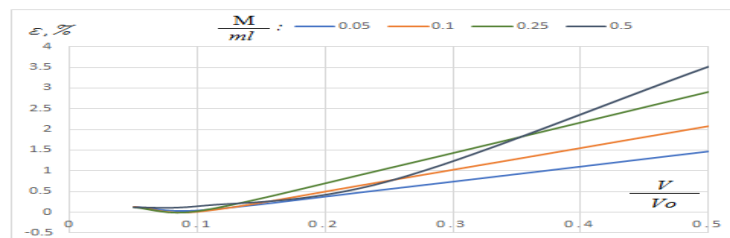


Рис. 5- Среднеквадратичное отклонение, (%)

Fig. 5- Standard deviation, (%)

Вывод. Анализ погрешности решения позволяет сделать вывод, что явную абсолютно устойчивую схему интегрирования уравнений движения в форме МКЭ можно применять в реальных задачах со сложной геометрией и распределением физико-механических параметров расчетной пространственной области. Предложенные методы решения позволяют моделировать динамическую работу конструкции при высокой степени ее дискретизации методом конечных элементов.

Устойчивость приведенных схем прямого интегрирования уравнений движения обеспечена в смысле критерия Дж. Неймана. Данные схемы являются абсолютно устойчивыми, что обеспечивает сходимость численного решения к точному при сгущении шага интегрирования по времени. Следовательно, проверку точности численных решений можно выполнять сравнением решений, построенных с разным по времени шагом интегрирования.

Библиографический список:

1. Работнов Ю Н. Механика деформируемого твердого тела. Механика деформируемого твердого тела. М.: Наука, 1979. 650 с.

2. Александров А.Ф., Потапов В.Д. Основы теории упругости и пластичности. [Основы эластичности]. М.: Высшая школа, 1990.
3. Деккер К., Вервер Я. Устойчивость методов Рунге-Кутты для жестких нелинейных дифференциальных уравнений. М.: Мир, 1988.-334с.
4. Gurtin M.E. Variational Principles for Linear Elastodynamics. Arch. Rat. Mech.-Anal, 1964;16:31-50.
5. Batha K.J. Finite Element Procedures. K.J. Baths. New Jersey: Prentice Hall, 1996.pp. 10-12.
6. Panasyuk L.N., Kravchenko G.M. Stability of direct circuits integrating the equations of motion in the simulation of the dynamics of destruction.-MATEC «Web of Conferences» 2017
7. Panasuk L.N., Kravchenko G.M., Trufanova E.V. Researching design solutions for frames of buildings in case of increased seismic intensity in specific zones. – Matec Web of Conferences. 2017 № 106, Импакт-фактор журнала (по JCR, SNIP, SJR): 0,17 DOI статьи: doi.org/10.1051/mateconf/201710602027
8. Панасюк Л.Н. Анализ точности явных устойчивых схем прямого интегрирования задачи динамики сооружений// Известия ВУЗов, Естественные науки. 1994. № 4, С.20-25
9. Панасюк Л.Н. О построении явных безусловно устойчивых схем прямого интегрирования задачи динамики сооружений// Известия ВУЗов, строительство. 1995. № 10, С.35-40
10. Панасюк Л.Н. О концепции программных комплексов решения задач строительной механики на основе объектно-ориентированного программирования. – Ростов н/Д.: РГАС, 1996. – 39с.

References:

1. Rabotnov Yu N. Mechanics of a deformable solid body. Mechanics of a deformable solid body. Moscow: Nauka, 1979; 650. (In Russ)
2. Aleksandrov A.F., Potapov V.D. Fundamentals of the Theory of Elasticity and Plasticity. [Fundamentals of Elasticity]. Moscow: Vysshaya shkola, 1990. (In Russ)
3. Dekker K., Verver J. Stability of Runge-Kutta methods for stiff nonlinear differential methods. Moscow: Mir, 1988;334 p.
4. Gurtin M.E. Variational Principles for Linear Elastodynamics. Arch. Rat. Mech.-Anal, 1964;16:31-50.
5. Batha K.J. Finite Element Procedures. K.J. Baths. New Jersey: Prentice Hall, 1996;10-12.
6. Panasiuk L.N., Kravchenko G.M. Stability of direct circuits integrating the equations of motion in the simulation of the dynamics of destruction.-MATEC «Web of Conferences» 2017
7. Panasiuk L.N., Kravchenko G.M., Trufanova E.V. Researching design solutions for frames of buildings in case of increased seismic intensity in specific zones. – Matec Web of Conferences. 2017 №106, Импакт-фактор журнала (по JCR, SNIP, SJR): 0,17 DOI статьи: doi.org/10.1051/mateconf/201710602027
8. Panasiuk L.N. Analysis of the accuracy of explicit stable direct integration schemes for the dynamics of structures. *Izvestiya VUZov, natural sciences*. 1994;4:20-25 (In Russ)
9. Panasiuk L.N. On the construction of explicit unconditionally stable schemes for direct integration of the problem of structural dynamics. *Izvestiya VUZov, stroitelstvo*. 1995;10:35-40 (In Russ)
10. Panasyuk L.N. On the concept of software systems for solving problems of structural mechanics based on object-oriented programming. Rostov n/A: RGAS, 1996;39. (In Russ)

Сведения об авторах:

Леонид Николаевич Панасюк, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Строительная механика и теория сооружений», Panasjuk.leonid@gmail.com

Андрей Александрович Фириченко, аспирант, кафедра «Строительная механика и теория сооружений»; sru-52.5@donstu.ru

Александра Дмитриевна Мерзлякова, старший преподаватель, кафедра «Системы автоматизированного проектирования»; Merzlyakova@mail.ru

Василина Сергеевна Тюрина, кандидат технических наук, доцент, доцент, кафедра «Строительная механика и теория сооружений»; vasilina.93@mail.ru

Information about authors:

Leonid N. Panasiuk, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department of Structural Mechanics and Theory of Structures; Panasjuk.leonid@gmail.com

Andrey A. Firichenko, Postgraduate, Department of Structural Mechanics and Theory of Structures;

Alexandra D. Merzlyakova, Senior Lecturer, Department of Computer-Aided Design Systems; Merzlyakova@mail.ru

Vasilina S. Tyurina, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Department of Structural Mechanics and Theory of Structures; vasilina.93@mail.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/ Received 15.05.2025.

Одобрена после рецензирования / Revised 01.06.2025.

Принята в печать / Accepted for publication 18.06.2025.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 628.87. 004.9

DOI: 10.21822/2073-6185-2025-52-2-220-226



Оригинальная статья /Original article

**Анализ энергетического баланса и моделирование системы отопления
для жилого дома**

И. Тальха

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

Резюме. Цель. Данное исследование сосредоточено на анализе спроса на отопление в здании, а также на соответствующем проектировании и моделировании отопительной системы. В исследовании оценивается тепловая эффективность здания, выявляются ключевые факторы, такие как внешние температурные условия и внутренние тепловые нагрузки. Исследование посвящено комплексному анализу энергетического баланса и проектированию системы отопления для жилого дома, расположенного в городе Виченца, Италия, с использованием метода моделирования энергетического баланса здания (Building Energy Modeling, BEM) в программном комплексе IES-VE 2023. **Метод.** Спрос на отопление моделируется и рассчитывается с учетом динамических условий, а отопительная система проектируется таким образом, чтобы обеспечить оптимальную работу и энергоэффективность. Для моделирования работы системы используются передовые инструменты, что позволяет оптимизировать потребление энергии и экономичность затрат. **Результат.** Разработана и проанализирована система отопления с использованием воздушного теплового насоса и радиантного пола, параметры которой были оптимизированы с учетом гидравлических характеристик и тепловых потерь. Результаты предоставляют ценные данные для эффективного проектирования отопительных систем и управления энергией в строительных проектах. **Вывод.** Анализ BEM с использованием идеальной системы для энергетического баланса, включая как чувствительные, так и латентные тепловые потоки, показал стабильную взаимосвязь между прибавками и потерями, иллюстрируя тепловую эффективность здания. Полученные результаты служат надежной основой для дальнейших разработок и внедрения энергоэффективных технологий в области проектирования систем отопления жилых зданий в аналогичных климатических зонах.

Ключевые слова: проектирование, отопительная система, тепловая эффективность, энергоэффективность

Для цитирования: И.Тальха. Анализ энергетического баланса и моделирование системы отопления для жилого дома. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025;52(2):220-226. DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-2-220-226

Energy balance analysis and heating system modeling for a residential building

I.Talha

North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy
(State Technological University),
44 Nikolaeva St., Vladikavkaz 362021, Russia

Abstract. Objective. The study focuses on the analysis of heating demand in the building, as well as on the design and modeling of the heating system. The thermal efficiency of the building is assessed, key factors are identified: external temperature conditions and internal heat loads. The study is devoted to the comprehensive analysis of the energy balance and the design of the heating system for a residential building located in Vicenza, Italy, using the Building Energy Modeling

(BEM) method in the IES-VE 2023 software package. **Method.** Heating demand is modeled and calculated taking into account dynamic conditions, and the heating system is designed for optimal operation and energy efficiency. Advanced tools are used to model the system operation, which allows for optimized energy consumption and cost efficiency. **Result.** An air source heat pump and radiant floor heating system is designed and analyzed, the parameters of which are optimized taking into account hydraulic characteristics and heat losses. The results provide valuable data for the efficient design of heating systems and energy management in building projects. **Conclusion.** BEM analysis using an ideal system for energy balance, including both sensible and latent heat fluxes, showed a stable relationship between gains and losses, illustrating the thermal efficiency of the building. The results serve as a basis for further development and implementation of energy-efficient technologies in the design of heating systems for residential buildings in similar climate zones.

Keywords: design, heating system, thermal efficiency, energy efficiency

For citation: I.Talha. Energy balance analysis and heating system modeling for a residential building. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2025;52(2):220-226. (In Russ) DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-2-220-226.

Введение. В условиях современных требований к энергоэффективности и устойчивому развитию зданий особое значение приобретает детальный анализ тепловых характеристик и энергетических потребностей жилых объектов с учетом климатических условий конкретного региона. В рамках исследования проведен климатический анализ, включающий оценку температурных режимов и параметров влажности воздуха, а также моделирование внутренних тепловых поступлений и энергетических потоков здания.

Особое внимание уделено количественной оценке чувствительных и латентных тепловых нагрузок, а также потребностей в отоплении, охлаждении и дехумификации на ежемесячной и годовой основе. На основе полученных данных разработана и проанализирована система отопления с использованием воздушного теплового насоса и радиантного пола, параметры которой были оптимизированы с учетом гидравлических характеристик и тепловых потерь.

Постановка задачи. Был проведен анализ с использованием BEM для кейс-исследования в Виченце, Италия, с использованием IES-VE 2023, результаты которого обрабатывались в Excel. Исследование оценивало энергетический баланс (ежемесячные чувствительные и скрытые количества) и энергетические потребности (ежемесячное и годовое охлаждение, отопление и дехумификация). Виченца расположена в зоне E (DPR 412/1993, HDD 2101–3000) и характеризуется холодными зимами и мягким летом, с отопительным сезоном с 15 октября по 14 апреля, с максимальным временем работы отопления до 14 часов в день. Как показано на рис. 1, в городе наблюдаются значительные колебания температуры воздуха (DBT) в течение года, со среднегодовой температурой 12,4°C.

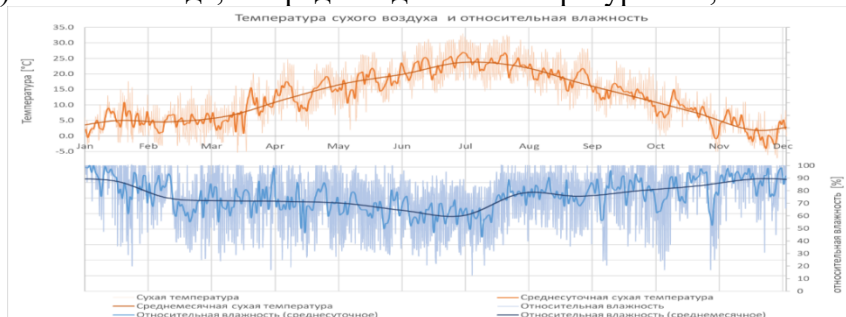


Рис. 1 – Температура сухого термометра и относительная влажность

Три линии для каждой категории соответствуют почасовым, суточным и месячным значениям, при этом темные оттенки указывают на каждый временной интервал

Fig. 1 – Dry thermometer temperature and relative humidity

The three lines for each category correspond to hourly, daily, and monthly values, with dark shades indicating each time interval

Температура в сезон охлаждения с октября по апрель обычно варьируется от $1,8^{\circ}\text{C}$ до $12,2^{\circ}\text{C}$ в среднем, с минимальной температурой $-7,1^{\circ}\text{C}$, зарегистрированной в ночное время, и максимальной температурой $24,7^{\circ}\text{C}$ в дневные часы.

Что касается относительной влажности (RH), в Виченце преобладает прохладная, но влажная погода, при этом средний уровень влажности остается повышенным около 70%, достигая пика в 89,5% в декабре. Проанализированное кейс-исследование представляет собой дом с общей площадью 140 м^2 , который был смоделирован в IES-VE.

Как показано на рис. 2, здание имеет прямоугольную основу размером $10\text{ м} \times 7\text{ м}$ и два этажа. Общая площадь оконных проемов составляет 23 м^2 , равномерно распределенных по четырем фасадам, при этом каждое окно имеет размеры $1\text{ м} \times 1\text{ м}$. Термическая проницаемость внешней стены, первого этажа, крыши и окон составляет 0,67, 0,28, 0,58 и $3,00\text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$ соответственно.

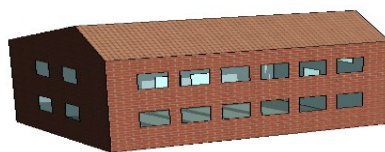


Рис. 2 – Аксонометрическое изображение исследуемого объекта

Fig. 2 – Axonometric image of the object under study

Тепло, выделяемое от присутствия людей, разделяется на 20 Вт конвективных и 40 Вт радиационных притоков на человека. Кроме того, скрытая теплота 40 Вт учитывается через влажность с массовым расходом $0,059\text{ кг}/\text{ч}$. Паттерн занятости следуют по часовой профиле, как показано на рис. 3. С другой стороны, тепловые притоки от электрооборудования следуют по суточному циклу, как показано на рис. 3, внося общий вклад в $13,4\text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$ в год.

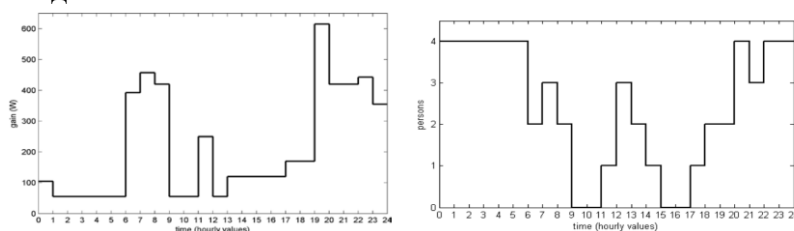


Рис. 3 – Профиль занятости и электропотребления

Fig. 3 – Employment and electricity consumption profile

Рис. 4 иллюстрирует баланс чувствительной и скрытой энергии для рассматриваемого кейс-исследования, основываясь на климатических условиях Виченцы.

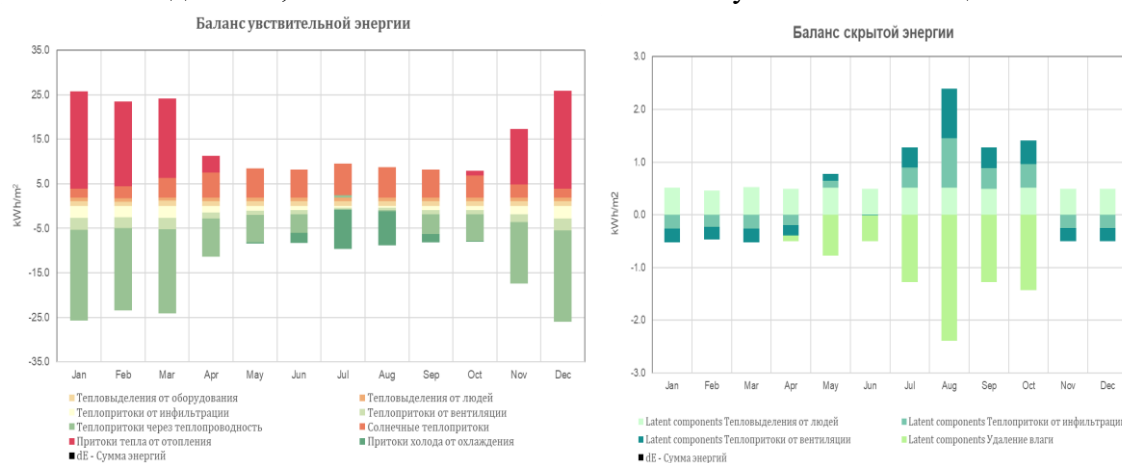


Рис. 4 – Энергетический баланс чувствительного и латентного тепла тепловой зоны

Fig. 4 – Energy balance of the sensitive and latent heat of the thermal zone

Чувствительная часть показывает, что наибольшая нагрузка на отопление приходится на декабрь, самый холодный месяц, составляя $22,1\text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$, что на 76,7% больше,

чем в ноябре — 12,5 кВт·ч/м². В то время как установка для дехумификации, учитывая скрытые нагрузки, имеет нулевые значения с ноября по март, и постепенно снижается в отрицательном диапазоне, достигая более теплых месяцев года.

Рис.5 показывает энергетические потребности на отопление, охлаждение и дехумификацию в течение месяцев года. Особенно, с ноября по март, наблюдается значительная потребность в отоплении, достигающая пика в декабре — 22,1 кВт·ч/м². Эта потребность постепенно снижается, достигая 17,7 кВт·ч/м² в марте, что представляет собой снижение примерно на 20% по сравнению с декабрем.



Рис. 5 – Месячные энергетические потребности для отопления, охлаждения и осушения исследуемого объекта, расположенного в Виченце

Fig. 5 – Monthly energy requirements for heating, cooling and dehumidification of the studied facility located in Vicenza

Годовые энергетические потребности показывают, что Виченца имеет преимущественно холодный климат, что приводит к значительным потребностям в энергии для отопления, которые значительно превышают потребности для охлаждения и дехумификации. Конкретно, потребности в энергии для отопления составляют 98,2 кВт·ч/м², что соответствует 77% от общего объема.

Обсуждение результатов. Подсистема – Радиантный пол. Параметры радиаторного пола, приведенные в табл. 1 ниже, используются для моделирования пола в программном обеспечении.

Таблица 1. Свойства слоев 1 и 2 стратиграфии

Table 1. Properties of stratigraphy layers 1 and 2

N	Описание Description	Толщина [m] Thickness	Плотность Density [kg/m ³]	Удельный вес [kg/m ²] Specific gravity
1	Керамическая плитка Ceramic tiles	0.015	2300	34.5
2	Адаптивный слой для радиаторного пола Adaptive layer for radiator floor	0.05	1800	90
Общий удельный вес Total specific gravity		124.5		

Трубопроводы радиантного пола. Расстояние между центрами двух смежных труб установлено на 25 см, а температуры на входе и выходе составляют 35°C и 25°C соответственно. Здание состоит из 5 комнат, каждая из которых имеет свою водяную петлю. Длина каждой петли составляет 112 м, внутренний диаметр труб 16 мм, а толщина 2 мм. Каждая петля может содержать эквивалентный объем воды 22,52 л. Потери давления в радиаторном полу составляют 15,12 МПа. В табл. 2 приведено резюме основных параметров, полученных в результате проектирования радиаторного пола.

Таблица 2. Параметры для расчета размера радиантного пола

Table 2. Parameters for calculating the size of the radiant floor

Q Проект. Чув.тепл. [kW]	Q' в.реф [kW]	m [kg/s]	Δp_луп [MPa]	Δp_реф [MPa]
6.4	1.28	0.03	3.024	15.12

Подсистема распределения. Учитывая ограничение давления в 250 Па/м для жилых зданий и объемный расход всей системы радиаторного пола, равный 0,15 кг/с, внутренний

диаметр труб 20 мм приводит к падению давления 150 Па/м. Кроме того, для предотвращения тепловых потерь в этой подсистеме трубы были установлены в наиболее критическом случае, то есть снаружи, где линейная теплопередача установлена на уровне 0,034 Вт/м·К, а толщина теплоизоляции труб составляет 23 мм. Тепловые потери составляют 98,09 кВт·ч/год, что соответствует 0,611% от тепла, необходимого для обеспечения комфорта (табл. 3).

Таблица 3. Параметры для расчета размера радиантного пола

Table 3. Parameters for calculating the size of the radiant floor

Q_потер [kWh/year]	Q_тепло [kWh]	Доля потерь [%]
98.09	16056.56	0.611%

Подсистема – Насос. Для компенсации потерь давления была выбрана насосная установка с удельной мощностью 136,2 Вт/(л/с), используя соответствующую формулу, представленную ниже.

$$P_{spec} = \frac{P_t}{V'_{water}} \left[\frac{W}{l/s} \right]$$

где, P_{spec} - удельная мощность насоса в [Вт/(л/с)]; P_t - мощность, потребляемая насосом в [Вт]; V'_{water} - объемный расход воды в [л/с]

Генерирующая система – Воздушный тепловой насос. Входные данные моделирования теплового насоса в IESVE, в основном COP и профиль тепловой мощности, приведены в табл. 4.

Таблица 4. COP и тепловая мощность выбранного теплового насоса

для различных внешних температур при постоянной скорости компрессора, равной 100%

Table 4. COP and heat output of the selected heat pump

for various external temperatures at a constant compressor speed of 100%

Рабочие условия отопления Heating operating conditions		Рабочие условия отопления Heating operating conditions	
Температура внешнего воздуха [°C] Outside air temperature	Тепловая выходная мощность [kW] Thermal output power	Температура внешнего воздуха Outside air temperature	Коэффициент полезного действия [-] Efficiency
-15	6.3	-15	2.6
-7	7.6	-7	3
2	9.6	2	3.6
7	11	7	4

Тепловая мощность эмиссионной системы, температуры воды и её массовый расход. Рис. 6 иллюстрирует изменение тепловой мощности системы отопления ($\dot{Q}_{emitted}$) и энергетических потребностей в самый холодный день, 21 декабря. Поскольку это самый холодный день, тепловая мощность системы отопления остается почти постоянной, следуя тренду, близкому к горизонтальной линии на уровне 6,6 кВт, с незначительными колебаниями, достигающими пика в 6,78 кВт около 10 часов утра.

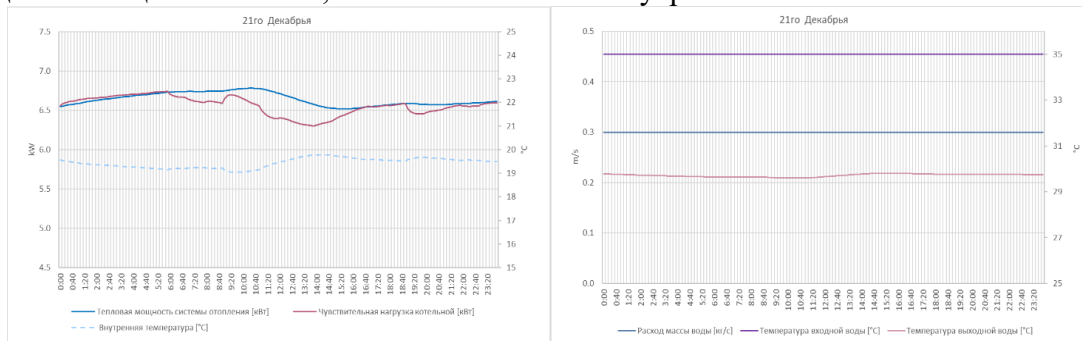


Рис. 6 – Почасовая производительность системы

Fig. 6 – Hourly system performance

Чувствительная нагрузка отопительного агрегата тесно следует за трендом $\dot{Q}_{emitted}$, что подтверждает, что система отопления эффективно удовлетворяет энергетические потребности. Так как 21 декабря является самым холодным днем, температура на входе

в систему отопления и массовый расход воды остаются постоянными, образуя четкую горизонтальную линию на уровнях 35°C и $0,3 \text{ кг/с}$ соответственно. Незначительные колебания наблюдаются только в выходной температуре из радиаторного пола, колеблющейся между $29,6^{\circ}\text{C}$ и $29,8^{\circ}\text{C}$.

Как показано на рис. 7, температура на входе начинается с примерно 35°C с незначительными колебаниями в начале каждого отопительного цикла. Она остается стабильной в течение всех интервалов отопления, демонстрируя постоянные условия на входе от системы генерации тепла. Напротив, температура на выходе имеет минимальный пик в начале каждого цикла отопления, а затем постепенно повышается с течением времени, достигая значений, близких к 30°C . Такое поведение отражает процесс теплообмена, происходящий в системе радиаторного пола.

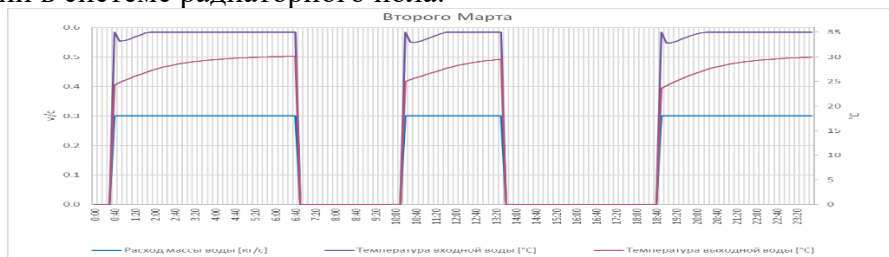


Рис. 7 – Почасовая производительность эмиссионной системы

Fig. 7 – Hourly output of the emission system

Ежемесячное сравнение. Рис. 8 показывает эмиссионную энергию, выходную энергию генерации, входную энергию генерации и энергетические потребности для отопления. Ясно, что система отопления полностью удовлетворяет энергетические потребности, с незначительной разницей между ними, которую можно устранить с помощью оптимизации системы управления. Кроме того, график подчеркивает эффективность системы каждый месяц, что отображается разрывом между входной энергией генерации и эмиссионной энергией.

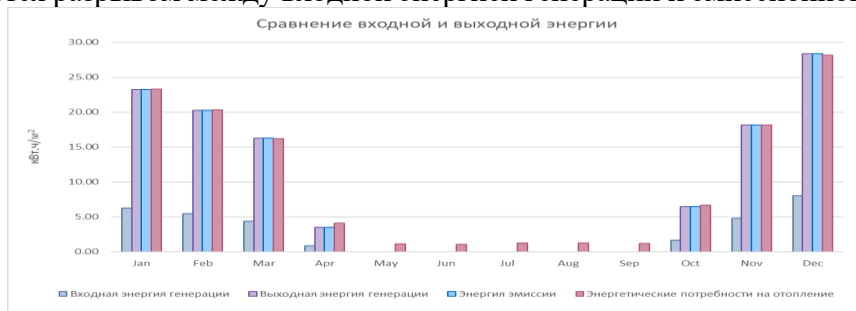


Рис. 8 – Энергетические значения системы: энергия эмиссии, энергия выхода генерации, энергия ввода генерации и потребности в энергии для отопления

Fig. 8 – Energy values of the system: emission energy, generation output energy, generation input energy, and energy requirements for heating

Самые холодные месяцы, декабрь и январь, демонстрируют наибольшие энергетические потребности ($28,15 \text{ кВт}\cdot\text{ч/м}^2/\text{месяц}$ и $23,28 \text{ кВт}\cdot\text{ч/м}^2/\text{месяц}$ соответственно), что приводит к пиковому потреблению электроэнергии в этот период ($11,06 \text{ кВт}\cdot\text{ч/м}^2/\text{месяц}$ в декабре, $8,77 \text{ кВт}\cdot\text{ч/м}^2/\text{месяц}$ в январе). В межсезонные месяцы (март, октябрь и ноябрь) энергетическая потребность снижается, и система соответственно регулирует свою работу. В летние месяцы (май - август) потребление энергии минимально или почти нулевое, и эта потребность не покрывается системой отопления.

Вывод. Анализ ВЕМ с использованием идеальной системы для энергетического баланса, включая как чувствительные, так и латентные тепловые потоки, показал стабильную взаимосвязь между прибавками и потерями, иллюстрируя тепловую эффективность здания. Годовые энергетические потребности на отопление выше, чем на охлаждение и осушение, что подтверждает, что климат региона имеет большие потребности в зимние месяцы, с пиковым значением в январе. В целом, моделирование с использованием идеальной

системы послужило надежной основой для будущих приложений, обеспечив ясность по энергетическим потребностям и направляя оптимизацию системы для специфического климата Виченцы. Анализ был сосредоточен на исследовании климатических характеристик и тепловых нагрузок с моделированием системы отопления в отопительный сезон для рассматриваемого случая. Результаты выбора проектирования и размеров различных подсистем гидравлической системы можно оценить на основе температуры в помещении. Выбранная система отопления эффективно поддерживает температуру внутри в пределах диапазона $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ в течение всего отопительного сезона (с 15 октября по 15 апреля), как и ожидалось от настроек системы управления.

В течение отопительного сезона количество часов вне диапазона $19-21^{\circ}\text{C}$ ограничено 46 часами, что составляет всего 2% года. Это демонстрирует, что система эффективно справляется с проектной тепловой нагрузкой 6,4 кВт, как было указано изначально. Система отопления с тепловым насосом и радиаторным полом демонстрирует эффективную работу, что подтверждается сезонным коэффициентом эффективности 3,65. Это свидетельствует о том, что система эффективно использует энергию в течение отопительного сезона, обеспечивая стабильное покрытие потребностей в отоплении при минимальном потреблении электроэнергии. Способность адаптироваться к изменяющимся сезонным потребностям дополнительно подчеркивает ее пригодность для энергоэффективного и устойчивого отопления.

Библиографический список:

1. ASHRAE, ASHRAE *Handbook—Fundamentals*, Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, 2021.
2. ISO 13790:2008, *Energy Performance of Buildings – Calculation of Energy Use for Space Heating and Cooling*, International Organization for Standardization, 2008.
3. ISO 52016-1:2017, *Energy Performance of Buildings – Energy Needs for Heating and Cooling, Internal Temperatures, and Sensible and Latent Heat Loads*, International Organization for Standardization, 2017.
4. ISO 13370:2017, *Thermal Performance of Buildings – Heat Transfer via the Ground – Calculation Methods*, International Organization for Standardization, 2017.
5. CIBSE, *Building Performance Modeling: AM11*, Chartered Institution of Building Services Engineers, London, U.K.
6. CIBSE, *Environmental Design: Guide A*, Chartered Institution of Building Services Engineers, London, U.K.

References:

1. ASHRAE, ASHRAE Справочник по основам, Атланта, Джорджия: Американское общество инженеров по отоплению, охлаждению и кондиционированию воздуха, 2021 г.
2. ISO 13790:2008, Энергоэффективность зданий. Расчет энергопотребления для отопления и охлаждения помещений, Международная организация по стандартизации, 2008 г.
3. ISO 52016-1:2017, Энергоэффективность зданий. Потребность в энергии для отопления и охлаждения, внутренняя температура, явная и скрытая тепловая нагрузка, Международная организация по стандартизации, 2017 г.
4. ISO 13370:2017, Теплоэффективность зданий. Теплопередача через грунт. Методы расчета, Международная организация по стандартизации, 2017 г.
5. CIBSE, Моделирование эксплуатационных характеристик зданий: AM11, Институт дипломированных инженеров строительных служб, Лондон, Великобритания.
6. CIBSE, Проектирование окружающей среды: Руководство А, Институт дипломированных инженеров строительных служб, Лондон, Великобритания.

Сведения об авторе:

Ихаб Тальха, аспирант, кафедра «Компьютерное моделирование и автоматизация проектирования»; ihabtalha.it@gmail.com

Information about author:

Ihab Talha, Postgraduate Student, "Computer modeling and automation of design"; ihabtalha.it@gmail.com

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/ Received 15.01.2025.

Одобрена после рецензирования / Reviced 01.03.2025.

Принята в печать /Accepted for publication 10.05.2025.

**Ремонтно-реставрационный раствор на основе гидравлической
строительной извести**

Г.Н. Хаджишалапов¹, П.Д. Батаева², Х.М. Батаева², А.Д. Батаев²

¹Дагестанский государственный технический университет,

¹367015, г. Махачкала, проспект Имама Шамиля, 70, Россия,

²Комплексный научно-исследовательский институт им. Х.И. Ибрагимова РАН,

²364051, г. Грозный, В. Алиева (Старопромысловское шоссе), 21а, Россия

Резюме. Цель. В настоящем исследовании представлены результаты разработки и исследования ремонтно-реставрационных составов на основе гидравлической извести и белого цемента, а также их физико-механические свойства и химический состав. **Метод.** В работе использовались экспериментальный метод разрушающего и неразрушающего контроля качества строительных материалов и рентгенофазовый анализ для определения минералогического состава образцов. **Результат.** Проведены физико-механические испытания образцов с целью подбора реставрационного состава для каменной кладки стен памятников истории и культуры башенного типа. **Вывод.** Разработанные ремонтно-реставрационные составы на основе гидравлической извести и белого цемента обладают удовлетворительными физико-механическими свойствами, что делает их перспективными для использования в реставрации и реконструкции объектов культурного наследия. Полученные результаты подтверждают возможность применения данных составов в строительной практике, что будет способствовать сохранению культурного наследия.

Ключевые слова: гидравлическая известь, белый цемент, ремонт, восстановление, реставрация, реконструкция, объекты культурного наследия, памятники истории и культуры

Для цитирования: Г.Н. Хаджишалапов, П.Д. Батаева, Х.М. Батаева, А.Д. Батаев. Экспериментальный подбор ремонтно-реставрационного состава раствора на основе гидравлической строительной извести. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025;52(2):227-234. DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-2-227-234

**Experimental selection of a repair and restoration composition of a solution based
on hydraulic construction lime**

G.N. Khadzhishalapov¹, P.D. Bataeva², Kh.M. Bataeva², A.D. Bataev²

¹Daghestan State Technical University,

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

²Kh.I. Ibragimov Integrated Research Institute of the Russian Academy of Sciences,

²364051, Grozny, V. Aliyeva (Staropromyslovskoe shosse), 21a, Russia

Abstract. Objective. This study presents the development and investigation of repair and restoration compositions based on hydraulic lime and white cement, as well as their physical and mechanical properties and chemical composition. **Method.** The work used an experimental method of destructive and non-destructive quality control of building materials and X-ray phase analysis to determine the mineralogical composition of the samples. **Result.** Physical and mechanical tests of the samples were carried out in order to select a restoration composition for the stone masonry of the walls of tower-type historical and cultural monuments. **Conclusion.** The developed repair and restoration compositions based on hydraulic lime and white cement have satisfactory physical and mechanical properties, which makes them promising for use in the restoration and

reconstruction of cultural heritage sites. The results confirm the possibility of using these compositions in construction practice, which can contribute to the preservation of cultural heritage.

Key words: hydraulic lime, white cement, repair, restoration, reconstruction, cultural heritage sites, historical and cultural monuments

For citation: G.N. Khadzhishalapov, P.D. Bataeva, H.M. Bataeva, A.D. Bataev. Experimental selection of repair and restoration composition of mortar based on hydraulic building lime. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2025;52(2):227-234. (In Russ) DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-2-227-234.

Введение. Российская Федерация богата объектами культурного наследия (памятниками истории и культуры) федерального значения и объектами, обладающими признаками памятников истории и культуры. Значительное количество объектов культурного наследия сосредоточено на Юге России в Северо-Кавказском федеральном округе (СКФО). К ним относятся объекты древнего периода и средневековья, такие как циклопические строения, боевые, полубоевые и жилые башни, скальные убежища, отдельные заградительные стены, склепы, святилища, храмы и менгиры, которых можно сгруппировать в три основных вида: объекты культурного наследия (ОКН) оборонительного характера, религиозного характера и погребального характера [1, 2].

Состояние объектов культурного наследия СКФО по степени разрушенности следующее: 60% объектов сильно разрушены (разрушение составляет 70% ÷ 100%); 30% – имеет среднее разрушение (разрушение составляет 30% ÷ 60%); 10% – имеет слабое разрушение (разрушение составляет 0% ÷ 20%).

Федеральным центром и правительствами Северо-Кавказских республик принимаются определенные меры по воссозданию, ремонту и реставрации объектов культурного наследия, но эти меры недостаточны, учитывая большой массив памятников истории и культуры в регионе: более 2500 боевых, полубоевых и жилых башен с пристройками, более 2000 склепов, святилищ и храмов и около 500 циклопических построек, скальных убежищ и отдельных заградительных стен и сооружений.

Постановка задачи. Каменная кладка при ремонте и восстановлении памятников истории и культуры башенного типа выполняется с использованием растворов на современных вяжущих веществах, а применяемые в настоящее время методы ремонта и усиления конструкций памятников сводятся, в основном, к наращиванию новых слоев из обычного бетона, созданию стальных обойм, или полной замене конструктивов, что противоречит предъявляемым требованиям. Поэтому разработка ремонтно-реставрационных составов, приближенных к оригинальным, является задачей важной и актуальной.

Лабораторными исследованиями, выполненными в Комплексном научно-исследовательском институте (КНИИ) имени Х.И. Ибрагимова РАН в соответствии с нормированной методикой, установлено, что раствор штукатурки и каменной кладки объектов культурного наследия содержат: гашеную известь (гидравлическую и гидратную), каустический доломит, каустический магнезит, доломитовую известь, сланцевую крошку, обожженную глину - пемянку, казеиновый компонент, древесную золу и др. Известь встречается, в основном, гидравлическая, казеиновый компонент присутствует в виде обезжиренного творога, сыворотки, кефира или простокваши. В составе кладочного раствора и штукатурки встречаются также природные и искусственные кислые гидравлические добавки: зола или вулканический пепел - пемза, мелкая кирпичная или керамическая крошка, толченая обожженная глина для колорирования и активизации известкового вяжущего.

Казеин является биоорганической добавкой, которая усиливает клеящие свойства и адгезию. Казеиновый компонент используется и как вяжущее, и как замедлитель схватывания композита. В свою очередь, древесная зола, повышая гидравлические свойства, повышает трещиностойкость, снижает теплопроводность, применяется в качестве искусственной кислой гидравлической добавки [3].

В большинстве случаев в качестве вяжущего применяется гидравлическая известь, наряду с использованием гипсового, ангидритового и доломитового вяжущего. Использование в качестве вяжущего гидравлической извести, полученной из мергелей и мергелистых известняков, способствует твердению раствора каменной кладки и штукатурки в воздушной и влажной средах. Образующаяся при обжиге карбонатных пород углекислота (C_2O) реагирует с оксидами SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , содержащими в минералах глины (Al_2O_3), синтезируя силикаты $2\text{C}_2\text{O SiO}_2$, алюминаты $\text{C}_2\text{O Al}_2\text{O}_3$ и ферриты кальция $2\text{C}_2\text{O Fe}_2\text{O}_3$, которые обладают гидравлическими свойствами, то есть способностью твердеть в сухих воздушных и влажных условиях.

Методы исследования. Результаты исследований, выполненные в КНИИ имени Х.И. Ибрагимова РАН, показывают, что гипсовое, ангидритовое, известковое и магнезиальное вяжущее усиливает прочностные и гидравлические характеристики, положительно сказывается на структурообразование, повышая оригинальность раствора каменной кладки и штукатурки [4-6, 12]. С учетом требований ГОСТ 28013-98 «Растворы строительные. Общие технические условия» [7-8] приняты четыре марки ремонтно-реставрационных смесей по подвижности, которые представлены в табл. 1.

Таблица 1. Марки растворов смесей по подвижности

Table 1. Grades of mortar mixtures by mobility

Марка по подвижности Brand by mobility Π_k	Глубина погружения конуса, см Cone immersion depth
1	2
Π_{k1}	1-4
Π_{k2}	5-8
Π_{k3}	9-12
Π_{k4}	13-16

Соотношения и пропорции компонентов (гидравлической извести, сланцевой крошки, доломитового песка, цемянки, древесной золы, казеинового компонента и пр.) в зависимости от требуемой марки раствора каменной кладки и штукатурки представлены в табл. 2.

Таблица 2. Экспериментальные составы раствора для каменной кладки стен старинных башенных и некропольных строений на одну балочку 4х4х16 см

Table 2. Experimental mortar compositions for masonry of walls of ancient tower and necropolis buildings for one beam 4x4x16 cm

№ составов № compositions	Сланцевая крошка, гр. Shale chips, gr.	Доломитовый песок фр. 0-2,5, гр. Dolomite sand fr. 0-2.5, gr.	Цемянка, гр. Cemenka, gr.	Вода, гр. Water, gr.	Гидравлическая известь Hydraulic lime	Известь пушонка, гр. Slaked lime, gr.	Древесная зола, гр. Wood ash, gr.
1	165	250	19	95	40	44	1
2	182	243	25	69	30	42	2
3	92	271	23	122	33	46	1
4	165	250	19	125	84	-	1
5	182	243	24	135	74	-	2
6	92	271	23	122	80	-	1
7	165	255	18	195	78	-	1
8	165	255	18	175	45	38	1
9	92	273	25	175	85	-	1
10	190	242	18	170	72	-	2
11	190	254	18	170	74	35	1
12	92	273	24	160	55	32	1

Обсуждение результатов. Марки ремонтно-реставрационных составов определялись испытанием балочек 40 х 40 х 160 мм на сжатие в возрасте 28 суток при температуре

твердения $21 \pm 2^\circ\text{C}$. В табл. 3 приведены физико-механические свойства экспериментальных составов ремонтно-реставрационного раствора.

Таблица 3. Физико-механические свойства экспериментальных составов ремонтно-реставрационного раствора

Table 3. Physical and mechanical properties of experimental compositions of repair and restoration mortar

№ экспериментальных составов No. of experimental compositions	Прочность на растяжение при изгибе, кг/см ² Tensile strength in bending, kg/cm ²	Прочность на сжатие, кг/см ² Compressive strength, kg/cm ²
1	2,25	19,7
2	2,15	16,2
3	1,87	5,5
4	2,35	20,4
5	0,95	6,2
6	2,05	6,3
7	2,21	46,7
8	2,14	47,7
9	1,8	21,5
10	2,3	25,7
11	0,95	33,3
12	2,07	19,5

В качестве активного вяжущего для приготовления ремонтно-реставрационного состава в экспериментальных целях был использован белый цемент (CEM 1.52,5 R) схожий по своим свойствам с гидравлической известью. Для определения прочностных характеристик в возрасте 7 и 28 суток и определения наиболее оптимальных составов ремонтно-реставрационных смесей было приготовлено 77 пробных замесов с применением белого цемента (CEM 1.52,5 R) в различных соотношениях, из которых формовались образцы-кубы размерами 70,7x70,7x70,7 мм и образцы-балочки 160 x 40 x 40 мм.

В результате испытаний отобраны наиболее оптимальные составы ремонтно-реставрационных смесей №1 - №9 с марками М10, М25, М50 и М75 для определения марок по подвижности и морозостойкости. Результаты представлены в табл. 4.

Таблица 4. Экспериментальные составы раствора для каменной кладки и штукатурки стен объектов культурного наследия на 1 м³

Table 4. Experimental compositions of mortar for masonry and plastering of walls of cultural heritage sites per 1 m³

№ состава № compositions	Сланцевая крошка, кг Shale chips.	Доломитовый песок, кг. Dolomite sand	Цемянка, кг. Cemenka, kg.	Вода, л. Water	Гидратная известь кг. Hydraulic lime	Древесная зола, кг. Wood ash, kg.	Белый цемент CEM 1.52,5R кг. White cement CEM 1.52.5R kg.	Казеиновый клей, кг. Casein glue, kg
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	620	990	75	354	175	4	155	-
2	625	1160	74	293	125	9	110	1,5
3	1245	160	145	265	135	6	97	-
4	715	960	92	274	164	7	125	-
5	1345	270	120	325	185	10	124	-
6	355	1065	95	405	180	5	133	-
7	264	1450	115	163	115	6	-	2,7
8	153	1385	93	292	144	12	-	2,3
9	128	1403	110	2387	93	11	-	2,1

Прочности ремонтно-реставрационных растворов в возрасте до 28 суток для каменной кладки и штукатурки представлены в табл.5. В табл.5 за 100% принята прочность ремонтно-реставрационного раствора в возрасте 28 суток при температуре твердения $21 \pm 2^\circ\text{C}$.

Таблица 5. Прочность ремонтно-реставрационных растворов для каменной кладки и штукатурки

Table 5. Strength of repair and restoration mortars for masonry and plaster

Возраст, суток Age, days	Температура твердения, °C Curing temperature						
	1	5	10	20	30	40	50
Прочность раствора, % Solution strength							
1	2	4	5	12	22	34	44
2	4	7	13	25	37	55	77
3	6	12	19	34	48	65	87
7	17	27	38	57	75	88	103
14	35	48	65	84	95	105	-
21	45	59	75	93	104	-	-
28	54	69	86	105	-	-	-

Физико-механические свойства экспериментальных составов ремонтно-реставрационного раствора представлены в табл. 6.

Таблица 6. Физико-механические свойства экспериментальных составов ремонтно-реставрационного раствора

Table 6. Physical and mechanical properties of experimental compositions of repair and restoration mortar

№	Размер образца, мм Sample size, mm	Возраст, суток Age, days	Масса образца, г Sample weight, g	Предел прочности при сжатии, кгс/см ² Compressive strength	Циклы морозостойкости Frost resistance cycles	Погружение конуса Cone immersion
1	2	3	4	5	6	7
1	70,7x70,7x70,7	28	510	78,7	85	6,5
2	70,7x70,7x70,7	28	470	27,6	30	12,5
3	70,7x70,7x70,7	28	475	25,7	36	3,8
4	70,7x70,7x70,7	28	515	50,5	45	5,5
5	70,7x70,7x70,7	28	467	52,5	35	5,4
6	70,7x70,7x70,7	28	485	57,5	72	6,8
7	70,7x70,7x70,7	28	484	14,2	15	1,5
8	70,7x70,7x70,7	28	467	24,6	20	2,7
9	70,7x70,7x70,7	28	477	24,7	18	2,3

На дифрактометре Shimadzu XRD-6000 выполнялись рентгенофазовые исследования, полученных образцов. С использованием электронного микроскопа РЭМ Quanta 3D 200i (США) и по снимкам, полученным с помощью данного микроскопа, изучалась морфология цементного камня [9]. В лабораторных условиях изготавливались изопластичные смеси, определялись показатели подвижности, затем из них формовались призмы 40 x 40 x 160 мм и кубы 70,7 x 70,7 x 70,7 мм. В табл. 7 представлены результаты исследований показателей подвижности ремонтно-реставрационного раствора.

Таким образом получили следующие составы с компонентами в весовых частях (сланцевая крошка 0-5 мм, доломитовый песок, известь-пушонка, белый цемент СЕМ 1.52,5; цемянка, зола древесная):

- М75 (состав №1) – 4,10:6,44:1,13:1,00:0,55:0,04;
- М50 (состав № 2) – 5,95:7,93:1,38:1,00:0,70:0,06;
- М50 (состав №3) – 2,74:8,17:1,345:1,00:0,73:0,03.

Повышение прочности на сжатие есть результат совместного воздействия продуктов новообразований всей системы. Об этом свидетельствуют рентгенограммы контрольного образца и образцов (1, 2, 3) (рис. 1).

Таблица 7. Результаты исследований ремонтно-реставрационного раствора

Table 7. Results of research of repair and restoration solution

№ п/п	Компоненты состава в 1кг/м ³ Composition components in 1 kg/m ³							Погружение конуса immersion	Подвижность растворной смеси Mobility of the solu- tion mixture	Морозостойкость Frost resistance	Предел прочности при сжа- тии, МПа
	Сланцевая крошка Shale chips.	Доломитовый песок Dolomite sand	Известь-пушонка Slaked lime	Белый цемент CEM 1.52,5R White cement CEM 1.52,5R	Цементка Semenka, kg.	Зола древесная Wood ash	Вода Water				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	627	985	173	155	77	4	355	6,4	П _к -2	85	7,8
2	714	955	164	125	94	7	274	5,5	П _к -2	44	5,2
3	355	1067	180	135	91	5	402	6,6	П _к -2	53	5,7

По кристаллографической и кристаллохимической базе данных для минералов и их структурных аналогов производилась идентификация минералов (WWW-MINCRYST).

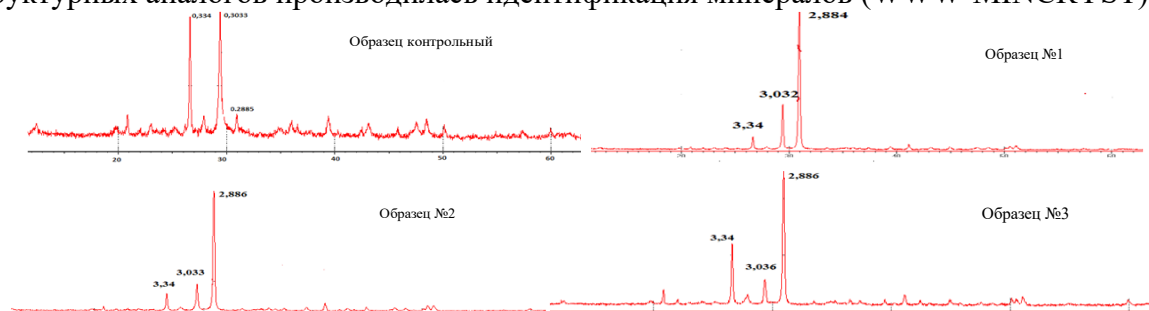


Рис. 1 – Рентгенограммы подобранных ремонтно-реставрационных составов

Fig. 1 – Radiographs of selected repair and restoration compositions

С целью подтверждения экспериментальных данных, полученных рентгенофазовыми исследованиями растровым электронным микроскопом Quanta 3D 200i, определены химические составы образцов ремонтно-реставрационных составов (табл. 8). Результаты в виде спектров образцов показаны на рис. 2.

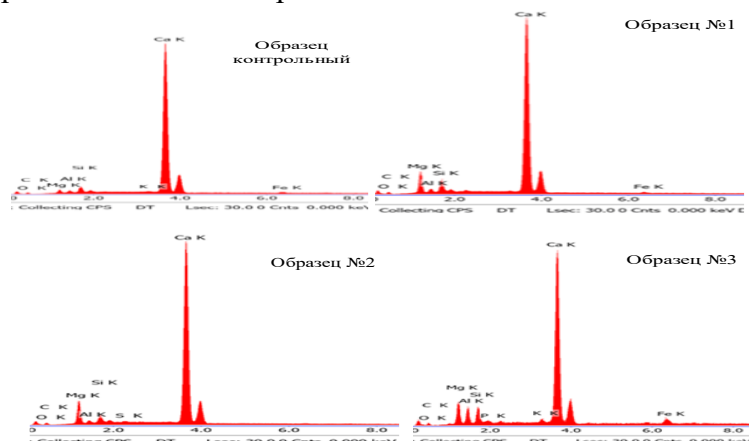


Рис. 2 – Спектры EDX образцов ремонтно-реставрационных составов

Fig. 2 – EDX spectra of repair and restoration composition samples

Структура и морфология образцов ремонтно-реставрационных составов представлены микроскопическими фотографиями (рис. 3-6), из которых видно, что в образцах присутствуют большое количество мелких пор и частиц различной природы и размеров, не имеющих четко выраженных форм.

Таблица 8. Химический анализ образцов ремонтно-реставрационных составов

Table 8. Chemical analysis of samples of repair and restoration compounds

№ п/п	Эле- мент Element	Количественный состав образцов подобранных составов Quantitative composition of samples of selected compositions			
		Образец контрольный Control sample	Образец 1 Sample	Образец 2 Sample	Образец 3 Sample
1	2	3	4	5	6
1	CO ₂	20,45	33,5	37,85	19,80
2	MgO	3,03	7,85	11,33	8,15
3	Al ₂ O ₃	1,55	0,74	1,14	3,04
4	SiO ₂	4,75	3,93	3,91	6,42
5	SO ₃			0,52	
6	K ₂ O	0,32	1,17		
7	CaO	69,25	53,38	55,24	61,27
8	Fe ₂ O ₃	0,64	0,67		0,95

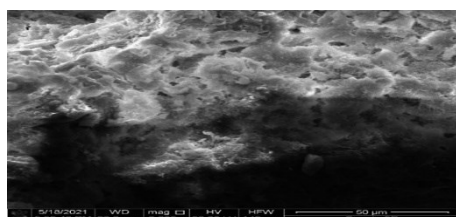


Рис. 3 – Образец контрольный

Fig. 3 – Control sample

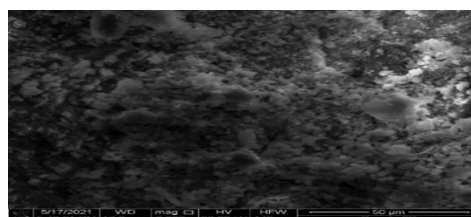


Рис. 4 – Образец № 1

Fig. 4 – Sample № 1

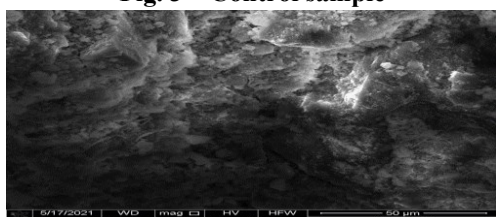


Рис. 5 – Образец № 2

Fig. 5 – Sample № 2

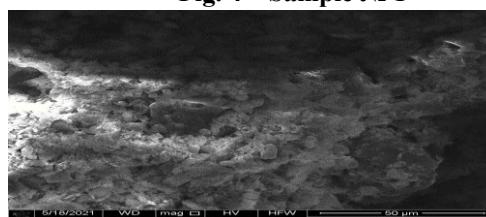


Рис. 6 – Образец № 3

Fig. 6 – Sample № 3

Вывод. Рентгенофазовый анализ подтверждает изменение межплоскостных расстояний в доломите, как минерале, в результате гидратационного твердения, на основании чего можно сделать вывод об участии доломитового компонента в физико-химических процессах формирования структуры ремонтно-реставрационного композита [10, 11].

Гидравлическая известь применяется для изготовления реставрационных, штукатурных и кладочных растворов, эксплуатируемых как в сухих, так и во влажных условиях и средах, а также для приготовления смешанных вяжущих. Практически вся каменная кладка и штукатурка объектов культурного наследия Северо-Кавказского федерального округа выполнена с использованием смешанных вяжущих в присутствии гидравлической извести. Долговечность ремонтных и реставрационных растворов на гидравлической извести сравнительно высока, поэтому памятники истории и культуры XV-XVI вв., уцелевшие от техногенных воздействий все еще сохранили свою несущую способность.

Библиографический список:

1. Батаева П.Д. Обзор составов и технологий для ремонта и реставрации объектов культурного наследия // Вестник Комплексного научно-исследовательского института им. Х.И. Ибрагимова Российской академии наук. – 2021. – № 5. – С. 49-53.
2. Батаева П.Д., Аларханова З.З. Многофункциональная химическая добавка для бетонных композитов // Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона». – № 6 (114). – 2024. – с. 469-478.
3. Бутт, Ю.М. Технология цемента и других вяжущих материалов – М: Стройиздат, 1976. – 407 с.
4. Вайвад, А.Я. Минеральные вяжущие вещества / А.Я. Вайвад. – Рига: Наука, 1971. – 315 с.
5. Волженский, А.В. Минеральные вяжущие вещества / А.В. Волженский. Технология и свойства: учебник. – 3-е изд., перераб. и доп. – М: Эколит, 2011. – 472 с.

6. Вологодский, Б.Ф. Инженерные работы при реставрации памятников архитектуры / Б.Ф. Вологодский. – М.: «Советская Россия», 1958. – С. 30.
7. ГОСТ 28013-98. «Растворы строительные. Общие технические условия».
8. ГОСТ Р 557338-2016 «Растворы строительные для каменной кладки. Методы определения предела прочности на сжатие и изгиб».
9. Parrot L.I. Increase in Creep of Hardened Cement Past due to Carnonaion unde Load. - Magazine Concrete Research, 1975, IX, v.27, № 92, p. 181-187.
10. Schaffler H., Druckfestigkeit von dampfgehartetem Casbeton nach, vershildener lagerung. - In: Lightweight Concrete / RILEM, Göteborg, 1961, s. 62-78.
11. Vasicek I. Trvanlivost a odolnost autoklavovovanych porovitych betonu pri posobeni susnych Vnejsich jena. - Stavivo, 1965, N 6, p. 136-149.
12. П.Д. Батаева, З.З. Аларханова, Х.М. Батаева, А.Д. Батаев. Тепломассообмен в процессах декарбонизации и карбонизации воздушных и гидравлических известковых вяжущих веществ и ремонтно-реставрационных составов на их основе. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2024;51(4):179-190. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-4-179-190.

References:

1. Bataeva P.D. Review of compositions and technologies for the repair and restoration of cultural heritage sites. *Bulletin of the Integrated Research Institute named after Kh.I. Ibragimov of the Russian Academy of Sciences*. 2021;5: 49-53. (In Russ)
2. Bataeva, P.D. Multifunctional chemical additive for concrete composites / P.D. Bataeva, Z.Z. Alarkhanova *Electronic scientific journal "Engineering Bulletin of the Don"*. 2024; (114): 469-478. (In Russ)
3. Butt, Yu.M. Technology of cement and other binders / Yu.M. Butt. - M: Stroyizdat, 1976; 407 p. (In Russ)
4. Vaivad, A.Ya. Magnesia binders. - Riga: Nauka, 1971;315 p.
5. Volzhensky, A. V. Mineral binders. *Technology and properties: textbook*. - 3rd ed., revised. and add. - M: Ekolit, 2011; 472 p. (In Russ)
6. Vologodsky, B. F. Engineering work in the restoration of architectural monuments. B. F. Vologodsky. M.: "Sovetskaya Rossiya", 1958; 30. (In Russ)
7. GOST 28013-98. "Building mortars. General specifications".(In Russ)
8. GOST R557338-2016 "Building mortars for masonry. Methods for determining the compressive and bending strength".(In Russ)
9. Parrot L.I. Increase in Creep of Hardened Cement Past due to Carnonaion unde Load. - *Magazine Concrete Research*, 1975; IX, 27 (92):181-187.
10. Schaffler H., Druckfestigkeit von dampfgehartetem Casbeton nach, vershildener lagerung. - In: Lightweight Concrete. *RILEM, Göteborg*, 1961; 62-78.
11. Vasicek I. Trvanlivost a odolnost autoklavovovanych porovitych betonu pri posobeni susnych *Vnejsich jena*. - *Stavivo*, 1965;6,:136-149.
12. P.D. Bataeva, Z.Z. Alarkhanova, Kh.M. Bataeva, A.D. Bataev. On the issue of forming the properties of restoration compositions based on air and hydraulic binders. *Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Sciences*. 2024;51(4):179-190.DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-4-179-190(In Russ)

Сведения об авторах:

Гаджимагомед Нурмагомедович Хаджишалапов, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология и организация строительного производства»; yarus-x@mail.ru

Петимат Денаевна Батаева, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории металлов, сплавов и композиционных материалов; bataeva_ggntu@mail.ru

Хава Маршаниевна Батаева, младший научный сотрудник лаборатории высокомолекулярных соединений; ya.vashka@mail.ru

Адам Денаевич Батаев, аспирант; adam.bataev1993@mail.ru

Information about the authors:

Gadzhimagomed N. Hadzhishalapov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department of Technology and Organization of Construction Production; yarus-x@mail.ru

Petimat D. Bataeva, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Laboratory of metals, alloys and composite materials; bataeva_ggntu@mail.ru

Khava M. Bataeva, Junior Researcher, Laboratory of high-molecular compounds; ya.vashka@mail.ru

Adam D. Bataev, Postgraduate Student; adam.bataev1993@mail.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 11.03.2025.

Одобрена после рецензирования/ Revised 21.04.2025.

Принята в печать/Accepted for publication 19.05.2025.

Нелинейные модели балок с переменной жёсткостью

А.К. Юсупов, Х.М. Муселемов, Р.И. Вишталов

Дагестанский государственный технический университет,
367015, г. Махачкала, пр. И.Шамиля,70, Россия

Резюме. Цель. В статье рассматриваются балочные конструкции, обладающие переменной жёсткостью, в которых проявляются физические нелинейности их опор и материала самой конструкции. В статье рассматриваются вопросы нелинейности опор, переменность жёсткости балки и дано решение соответствующих дифференциальных уравнений, содержащих переменные коэффициенты. **Метод.** Приведены особенности работы нелинейно-упругих опор балок, описывается переменность жёсткости, указанных конструкций, которые проявляют существенные физические нелинейности. Путём введения специальных обозначений дифференциальные уравнения, содержащие переменные коэффициенты, приводятся к виду, которые позволяют получить классическое их решение. **Результат.** Рассмотрены балки на нелинейно-упругих опорах, балки с переменной жесткостью, а также балочные конструкции, балки, материал которых не следует закону Гука. Построено классическое решение дифференциального уравнения поперечного изгиба балок с переменной жёсткостью; приведены расчётные схемы, формулы, таблицы и графики. **Вывод.** Разработанные алгоритмы и полученные результаты позволяют учитывать нелинейную работу опор, влияние переменности жёсткости балок, физические нелинейности материала конструкции. Результаты исследования могут найти применение в практике проектирования и строительства.

Ключевые слова: балки, опоры, нелинейности, дифференциальные уравнения, поперечный изгиб, внутренние усилия, прогибы, перемещения, расчётные схемы

Для цитирования: А.К. Юсупов, Х.М. Муселемов, Р.И. Вишталов. Нелинейные модели балок с переменной жёсткостью. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025;52(2):235-246. DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-2-235-246

Nonlinear models of beams with variable stiffness

A.K. Yusupov, Kh.M. Muselemov, R.I. Vishtalov

Daghestan State Technical University,
70 I. Shamilya Ave., Makhachkala 367026, Russia

Abstract. Objective. The article examines beam structures with variable rigidity, in which physical nonlinearities of their supports and the material of the structure itself are manifested. The article examines issues of support nonlinearity, beam rigidity variability, and provides a solution to the corresponding differential equations containing variable coefficients. **Method.** The features of the operation of nonlinear elastic beam supports are presented, and the variability of rigidity of the specified structures, which exhibit significant physical nonlinearities, is described. By introducing special notations, differential equations containing variable coefficients are reduced to a form that allows constructing their classical solution. **Result.** Beams on nonlinear-elastic supports, beams with variable stiffness, as well as beam structures, beams, the material of which does not follow Hooke's law, are considered. A classical solution to the differential equation of transverse bending of beams with variable rigidity is constructed; calculation schemes, formulas, tables and graphs are provided. **Conclusion.** The developed algorithms and the obtained results

allow taking into account the nonlinear operation of supports, the influence of variability of beam stiffness, physical nonlinearities of the material of the structure. The results of the study can be used in the practice of design and construction.

Keywords: beams, supports, nonlinearities, differential equations, transverse bending, internal forces, deflections, displacements, calculation schemes

For citation: A.K. Yusupov, Kh.M. Muselemov, R.I. Vishtalov. Nonlinear models of beams with variable stiffness. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2025;52(2): 235-246. (In Russ) DOI:10.21822 /2073-6185-2025-52-2-235-246

Введение. Под действием внешних нагрузок [1-8] балочные конструкции подвергаются изгибу. При этом проявляются различные нелинейности, описывающие изменения геометрии (перемещения), зависимости напряжений от деформации, контактные особенности опор (дискретных и сплошных), которые существенно влияют на работу балок, как системы, работающей на упругих или упруго-податливых опорах. Принято классифицировать нелинейности следующим образом: физические нелинейности; геометрические нелинейности; конструктивные нелинейности.

При расчете реальных балочных конструкций указанные выше нелинейности проявляются по-разному. Эти нелинейности встречаются каждая отдельно и в сочетании друг с другом. Например, при больших перемещениях [7] проявляются геометрические нелинейности; при жестких конструкциях существенное влияние имеют физические нелинейности; если балочная конструкция покоится на сплошных или дискретных опорах, то контактные напряжения нелинейно зависят от величины прогибов, перемещении. При этом могут проявляться физические нелинейности конструкционного материала самой балки. При расчете и проектировании балочных конструкций необходимо учитывать влияние указанных выше нелинейностей на напряженно деформированное состояние конструкции.

Многие части конструкций зданий и сооружений, детали машин и механизмов в процессе эксплуатации взаимодействуют между собой. При этом совместная работа взаимодействующих конструкций зачастую предопределяет их расчетные параметры, которые используются при проектировании. Неправильное описание особенностей работы опор (связей) приводит к существенным ошибкам и к аварийной ситуации конструкции. Часто при учете особенностей опор, на которых покоится балка, предполагается, что связь между балочной конструкцией и опорой - линейная как при положительных значениях прогибов, так и при отрицательных. В практике проектирования и строительства встречаются и более сложные ситуации: связь между реакциями опор и прогибами балки описываются нелинейными функциями. При этом расчетная схема балки существенно меняется. Представленные положения о балочных конструкциях, лежащих на дискретных опорах, справедливы также и в случае плит, лежащих на дискретных опорах или массивах.

Постановка задачи. Решение задач, связанных с балками, где учитываются указанные нелинейности, достаточно сложно. Здесь приходится применять численные методы анализа [5], где применяются различного рода вариационные и итерационные методы [4] (методы последовательных приближений). Здесь необходимо отметить, что иногда нелинейности, существенно влияют на напряженно-деформированное состояние балочных конструкций. При расчете и компоновке балочных конструкций их опоры рассматриваются как линейные системы. В статье разработаны алгоритмы с использованием обобщенных функций, что позволяет вводить в дифференциальные уравнения поперечного изгиба балок соответствующие звенья.

Методы исследования. Для описания особенностей работы этих опор пользуются моделью Винклера. Работа опор балочных конструкций не всегда подчиняется линейным зависимостям: эти зависимости существенно нелинейны и для их описания необходимо пользоваться обобщенными функциями [3,6], которые позволяют учитывать дискретность опор и скачкообразные изменения их реакций. Обычные функции не позволяют проделать эти процедуры.

Таблица 1. Схемы опор балки и соответствующие им аналитические выражения
Table 1. Beam support schemes and corresponding analytical expressions

№ п/п	Схема опоры Support diagram	График функции Function graph	Аналитические выражения Analytical expressions Function
1			$-\infty < y(l_1) < \infty$ $y = y(x)$ $x = -cy(l_1)$
2			$X = -A[y(l_1)]^v \cdot e[y(l_1)]$ $y = y(x); \quad -\infty < y(l_1) < \infty$ e – единичная функция A, v – параметры $v = \frac{2k+1}{2i+1}$ $k, i = 0, 1, 2, 3, 4$
3			$y = y(u); \quad -\infty < y(l_1) < \infty$ $X = -A[y(l_1) - u_1]^v \cdot e[y(l_1) - u_2]$ $v = \frac{2k+1}{2i+1}; \quad i, k = 0, 1, 2, 3, \dots$ e – единичная функция
4			$y = y(u); \quad -\infty < y(l_1) < \infty$ $X = -A[y(l_1) - u_1]^v \cdot e[y(l_1) - u_1] +$ $- B[y(l_1) - u_1^*]^\mu \cdot e[-y(l_1) + u_1^*]$ $v = \frac{2k+1}{2i+1}; \quad i, k = 0, 1, 2, 3, \dots$ $u_1 \geq 0$ $u_1^* \leq 0$ e – единичная функция
5			$y = y(u); \quad -\infty < y(l_1) < \infty$ $X = [y(l_1) \{ -c e[y(l_1)] -$ $- (A-c) \cdot e[y(l_1) - u_1] -$ $- D \cdot e[-y(l_1) - (B-D) \times$ $\times e[-y(l_1) + u_1^*] \} ;$ e – единичная функция

Таким образом, уравнения приспособляются к особенностям работы опор балок с односторонними связями. Всё это позволяет путём решения дифференциальных уравнений получать значения перемещений и внутренних усилий в сечениях балок с учётом особенностей работы опор.

В инженерной практике, если не всегда, то очень часто, можно получить зависимость реакции опоры X_i от прогиба балки $y(l_i)$. В простейшем случае это – линейная зависимость ($X_i = c_i \cdot y(l_i)$), которой мы уже пользовались неоднократно. В реальных конструкциях эта зависимость может иметь более сложный вид.

В табл.1 приведены схемы опор балки и соответствующие им аналитические выражения $X = f(x)$ и графические изображения зависимости $f(y)$.

Балки с переменной жесткостью. Рассмотрим балки, когда жесткость $EJ = \alpha_0 + \alpha_1(x)$ представляет собой функцию координаты «х» продольной оси балки. Приведем алгоритм, основанный на использовании метода малого параметра [7].

Рассмотрим конкретный пример балки. Дополнительно предположим, что жесткость

$$\alpha(x) = \alpha_0 + \alpha_1(x), \quad (1)$$

где $\alpha_0 = \text{const} = EJ$ (EJ – жесткость сечения балки при изгибе),
 $\alpha_1(x)$ – переменная составляющая жесткости.

Будем считать, что функция $\alpha_1(x)$ мало отклоняется от своего среднего значения α_0 . На этом основании введем параметр малости ε . Тогда выражение (1) можем представить так:

$$\alpha(x) = \alpha_0 + \varepsilon \cdot \alpha_1(x), \quad (2)$$

Далее по аналогии с уравнением (3) имеем

$$\alpha(x) \cdot y^{IV} + 2\alpha'(x) \cdot y''' + \alpha'' \cdot y'' = q(x). \quad (3)$$

Функцию прогибов $y(x)$ представим [4], [12] в виде ряда по степеням малого параметра ε :

$$y(x) = y_0(x) + \varepsilon \cdot y_1(x) + \varepsilon^2 \cdot y_2(x) + \varepsilon^3 \cdot y_3(x) + \dots \quad (4)$$

Здесь $y_0, y_1, y_2, \dots$ – некоторые пока неизвестные функции.

Подставляя суммы (1) и (4) в уравнение (3), приравнявая члены при одинаковых степенях параметра ε и пренебрегая слагаемыми, содержащими $\varepsilon^2, \varepsilon^3, \varepsilon^4, \dots$, как малыми величинами более высокого порядка, получаем уравнения:

$$\begin{cases} \alpha_0 \cdot y_0^{IV} = q(x), \\ \alpha_0 \cdot y_1^{IV} = -\alpha_1(x) \cdot y_0^{IV} - 2\alpha'_1(x) \cdot y_0''' - \alpha''_1(x) \cdot y_0''. \end{cases} \quad (5)$$

$$\alpha_0 \cdot y_1^{IV} = -\alpha_1(x) \cdot y_0^{IV} - 2\alpha'_1(x) \cdot y_0''' - \alpha''_1(x) \cdot y_0''. \quad (6)$$

Решение уравнения (5) представим в виде интеграла

$$y_0(x) = \int_0^l G_6(x, \xi) \cdot q(\xi) d\xi. \quad (7)$$

Здесь функция Грина, который строится для рассматриваемой задачи.

Теперь правая часть уравнения (6) стала уже известной.

Подставляя функцию (7) в уравнение (6) получаем

$$\alpha_0 \cdot y_1^{IV}(x) = F(x), \quad (8)$$

где введено обозначение

$$\begin{aligned}
 F(x) = & -\alpha_1(x) \cdot \int_0^l \frac{\partial^4 G_6(x, \xi)}{\partial x^4} \cdot q(\xi) d\xi - \\
 & - 2\alpha'_1(x) \cdot \int_0^l \frac{\partial^3 G_6(x, \xi)}{\partial x^3} \cdot q(\xi) d\xi - \\
 & - \alpha''_1(x) \cdot \int_0^l \frac{\partial^2 G_6(x, \xi)}{\partial x^2} \cdot q(\xi) d\xi .
 \end{aligned} \quad (9)$$

Решение уравнение (8) представим по аналогии с интегралом (7):

$$y_1(x) = \int_0^l G_6(x, \xi) \cdot F(\xi) d\xi, \quad (10)$$

где функция $F(x)$ определена выражением (9).

Окончательно функцию прогибов $y(x)$ запишем в виде суммы, которая следует из ряда (4) (при $\varepsilon = 1$), $y_2 \approx y_3 \approx 0$:

$$y(x) = y_0(x) + y_1(x). \quad (11)$$

Здесь y_0 и y_1 даны интегралами (7) и (10). Располагая функция прогибов (11), можно определить изгибающие моменты M и поперечные силы Q по известным правилам.

Балки, материал которых не следует закону Гука. Многие материалы, такие как сталь, бетон, пластмассы, древесина и др. [2,10,11] при больших напряжениях не следуют закону Гука (рис.1.)

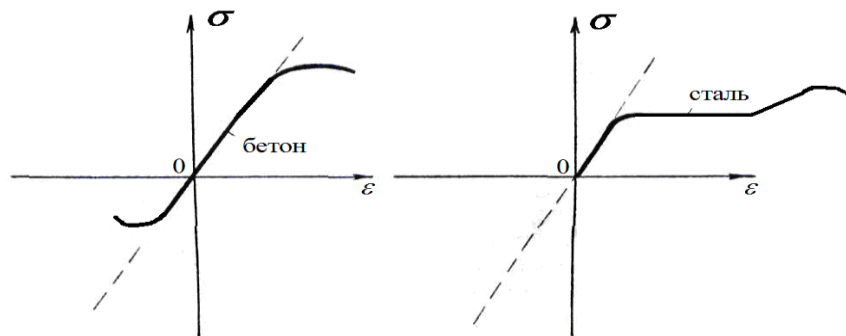


Рис.1- Зависимости напряжений от относительных деформаций для бетона и стали
Fig. 1 - Dependences of stresses on relative deformations for concrete and steel

На рис.1 – пунктирные графики соответствуют закону Гука, а сплошные – экспериментальным кривым.

Пусть зависимость между напряжениями σ и относительными деформациями ε имеет вид степенной функции. Тогда напряжения $\sigma = f(\varepsilon)$ запишутся так:

$$\sigma = A_0 \cdot \varepsilon^k. \quad (12)$$

Для этого случая дифференциальное уравнение поперечного изгиба балки дано

$$\text{в виде уравнения } \left\{ A_0 J \left[y'' - \frac{3}{2} y'' (y')^2 \right]^k \right\}'' = q(x).$$

Рассмотрим выражение $u = \left[y'' - \frac{3}{2} y'' \cdot (y')^2 \right]^k$, входящее в это уравнение.

Разложим функцию u в ряд Тейлора и ограничимся его двумя членами:

$$\left[y'' - \frac{3}{2} y'' \cdot (y')^2 \right]^k = (y'')^k \cdot \left[1 - \frac{3}{2} \cdot k \cdot (y')^2 \right]. \quad (13)$$

Здесь предполагается, что $3/2 (y')^2 < 1$.

С учетом (13) уравнение (7) представим так:

$$A_0 J \cdot \left\{ (y'')^k \cdot \left[1 - \frac{3}{2} \cdot k \cdot (y')^2 \right] \right\}'' = q(x). \quad (14)$$

Здесь момент инерции сечения балки J вычисляется по известным правилам [2]. При $k = 1$ уравнение (14) описывает прогибы $y(x)$ балки с учетом ее геометрической нелинейности. А если пренебречь (для достаточно высоких балок $(y')^2 = 0$ вторым слагаемым в квадратной скобке, то уравнение (14) упрощается:

$$A_0 \cdot J \left[(y'')^k \right]'' = q(x). \quad (15)$$

Уравнение (15) учитывает только физическую нелинейность (12).

Поскольку здесь рассматриваются балки, материал которых не следует закону Гука, дальше будем пользоваться уравнением (15).

Выполнив операции дифференцирования, уравнение (15) представим в следующем виде:

$$k \cdot (y'')^{k-1} \cdot y^{IV} + k \cdot (k-1) \cdot (y'')^{k-2} \cdot (y''')^2 = \bar{q}(x), \quad (16)$$

где $\bar{q}(x) = q(x) / A_0 \cdot J$.

При $k = 1$ это уравнение принимает обычный вид $y^{IV}(x) = \bar{q}(x)$. Прибавим в обе части уравнения (16) произведение

$$\alpha_0 \cdot y^{IV}(x) = \bar{q}(x) + F(x). \quad (17)$$

Здесь: α_0 - жесткость сечения балки при изгибе, когда $k = 1$;

$$F(x) = \alpha_0 \cdot y^{IV}(x) - k \cdot [y''(x)]^{k-1} \cdot y^{IV}(x) - k(k-1) \cdot [y''(x)]^{k-2} \cdot [y'''(x)]^2. \quad (18)$$

Обычно поправки на прогиб $y(x)$, обусловленные учетом физической нелинейности материала, составляют 20 - 30% от упругих прогибов. Поэтому введем параметр малости ε и уравнение (16) запишем в виде

$$\alpha_0 y^{IV}(x) = \bar{q}(x) + \varepsilon \cdot F(x). \quad (19)$$

Решение этого уравнения будем искать в виде ряда по степеням малого параметра (3) [6,7]. Подставив ряд (3) и выражение (18) в уравнение (19), по аналогии с уравнениями (5) и (6) будем иметь

$$\begin{cases} \alpha_0 \cdot y_0^{IV} = \bar{q}(x), \\ \alpha_0 \cdot y_1^{IV} = \bar{F}(x), \end{cases} \quad (20)$$

$$\begin{cases} \alpha_0 \cdot y_0^{IV} = \bar{q}(x), \\ \alpha_0 \cdot y_1^{IV} = \bar{F}(x), \end{cases} \quad (21)$$

$$F(x) = \alpha_0 \cdot y^{IV}(x) - k [y_0^{IV}(x)]^{k-1} \cdot y_0^{IV}(x) - k(k-1) \cdot [y_0''(x)]^{k-2} \cdot [y_0'''(x)]^2. \quad (22)$$

где

Если нам задана конкретная балка с указанием условий крепления ее концов и промежуточных опор, то пользуясь рекуррентным методом, мы можем построить функцию Грина. Решение уравнения (19) можно представить так:

$$y_0(x) = \int_0^l G_6(x, \xi) \cdot q(\xi) d\xi. \quad (23)$$

Теперь правая часть уравнения (21) (выражение 22) стала вполне определенной. Это позволяет получить функцию

$$y_1(x) = \int_0^l G_6(x, \xi) \cdot \bar{F}(\xi) d\xi. \quad (24)$$

Окончательно функцию прогибов по аналогии с суммой (11) находим в виде

$$y(x) \approx y_0(x) + y_1(x), \quad (25)$$

где слагаемые y_0 и y_1 даны интегралами (23) и (24).

Классическое решение для балки с переменной жесткостью. Решения для балок, полученные на основе функции Грина, являются точными. При использовании вариационных методов [4] соответствующие решения только приближенно удовлетворяют уравнению изгиба балки, поскольку ряды, представляющие решения, не сходятся в точке $x = \xi$, а число удерживаемых членов практически всегда ограничено. Тем не менее, использование вариационных методов обеспечивает достаточную для практических целей точность и простоту решения при определении соответствующих производных функций Грина. Поэтому функция Грина, вычисляемая точными методами или в виде ряда, позволяет получать достоверные результаты.

Указанная функция Грина была нами использована для построения приближенного решения балок с переменной жесткостью. Приближенные решения, хотя обеспечивают достаточную точность, однако, как отмечалось выше, удовлетворяют уравнению изгиба балки только приближенно. Такие решения (решения, получаемые на основе вариационных, итерационных и других минимизирующих энергию – минимизирующих функционал – методов) обычно называют обобщенными. Если же решение при непосредственной подстановке в дифференциальные уравнения превращает это уравнение в тождество, то такое решение называют классическим. Таким образом, различают обобщенные (приближенные) и классические (точные) решения уравнения изгиба балок.

При этом и обобщенные, и классические решения должны точно удовлетворять граничным условиям (условиям крепления балки на крайних и промежуточных опорах).

Далее приведем построение классического решения для балки с переменной жесткостью. Пусть $EJ = \alpha(x)$ – переменная жесткость сечения однопролетной балки ($\alpha(x)$ – дважды дифференцируемая функция). Уравнение изгиба запишем в виде

$$(\alpha y'')' = q(x) \quad (26)$$

Здесь изгибающий момент и поперечная сила выражаются через прогибы:

$$(\alpha y'') = -M(x), \quad (27)$$

$$\frac{dM}{dx} = -(\alpha \cdot y'')' = Q(x). \quad (28)$$

Уравнения (26) и (27) можно представить в виде системы

$$\begin{cases} M'' = -q_0(x), \\ y'' = -M(x) \cdot \alpha^{-1}(x). \end{cases} \quad (29)$$

Из первого уравнения этой системы следует, что изгибающие моменты

$$M(x) = - \iint q(x) dx^2 - C_3 \cdot x - C_2, \quad (30)$$

а из второго – прогибы

$$y(x) = - \iint M(x) \cdot \alpha^{-1}(x) dx^2 - C_1 \cdot x + C_0. \quad (31)$$

Подставляя выражение (30) в интеграл (31), окончательно имеем решение для прогибов

$$y(x) = \iint \left[\alpha^{-1}(x) \cdot \left(\iint q(x) dx^2 + C_3 \cdot x + C_2 \right) \right] dx^2 - C_1 \cdot x + C_0. \quad (32)$$

Здесь произвольные постоянные C_0, C_1, C_2, C_3 определяются из условия крепления однопролетной балки на левой и правой опорах. Подстановка функции (32) в уравнение (26) превращает последнее в тождество, то есть решение (32) является классическим. Далее поставим перед собой цель: представить решение (32) через функцию Грина.

Пусть
$$\frac{\partial^2 \bar{G}}{\partial x^2} = \delta(x - \xi). \quad (33)$$

Отсюда найдем

$$\bar{G}(x, \xi) = \iint \delta(x - \xi) dx^2 + \bar{C}_3 \cdot x + \bar{C}_2. \quad (34)$$

где $\bar{C}_2, \bar{C}_3$ - постоянные интегрирования.

Пользуясь зависимостями (12), интеграл (31) запишем так:

$$\bar{G}(x, \xi) = \frac{1}{2} |x - \xi| + \frac{1}{2} (x - \xi) + \bar{C}_3 \cdot x + \bar{C}_2. \quad (35)$$

Введем обозначение

$$B(x - \xi) = \frac{1}{2} \cdot (|x - \xi| + x - \xi). \quad (36)$$

Тогда вместо выражения (32) будем иметь

$$\bar{G}(x, \xi) = B(x - \xi) + \bar{C}_3 \cdot x + \bar{C}_2. \quad (37)$$

Теперь решение первого уравнения из системы (29) можно выразить через функцию (37):

$$\begin{aligned} M(x) &= - \int_0^l [B(x - \xi) + \bar{C}_3 \cdot x + \bar{C}_2] q(\xi) d\xi = \\ &= - \int_0^l B(x - \xi) q(\xi) d\xi + C_3 \cdot x + C_2. \end{aligned} \quad (38)$$

Здесь введены новые произвольные постоянные интегрирования

$$\begin{aligned} C_2 &= \bar{C}_2 \cdot \int_0^l q(\xi) d\xi, \\ C_3 &= \bar{C}_3 \cdot \int_0^l q(\xi) d\xi. \end{aligned}$$

Аналогично можно представить решение и второго уравнения из системы (29):

$$\begin{aligned}
 y(x) &= - \int_0^l \left[B(x-\xi) + \bar{C}_1 \cdot x + \bar{C}_0 \right] M(\xi) \cdot \alpha^{-1}(\xi) d\xi = \\
 &= - \int_0^l B(x-\xi) M(\xi) \cdot \alpha^{-1}(\xi) d\xi + C_1 \cdot x + C_0.
 \end{aligned} \quad (39)$$

Как и ранее, здесь также введены новые произвольные постоянные интегрирования

$$\begin{aligned}
 C_0 &= \bar{C}_0 \cdot \int_0^l M(\xi) \cdot \alpha^{-1}(\xi) d\xi, \\
 C_1 &= \bar{C}_1 \cdot \int_0^l M(\xi) \cdot \alpha^{-1}(\xi) d\xi
 \end{aligned}$$

Далее для получения функции прогибов в окончательном виде достаточно представить изгибающий момент (38) в подынтегральное выражение (39):

$$\begin{aligned}
 y(x) &= \int_0^l B(x-\xi) \cdot \alpha^{-1}(\xi) \times \\
 &\times \left\{ \int_0^l B(\xi-\eta) q(\eta) d\eta + C_3 \cdot \xi + C_2 \right\} d\xi + C_1 \cdot x + C_0.
 \end{aligned} \quad (40)$$

Этот интеграл удобно представить так:

$$\begin{aligned}
 y(x) &= \int_0^l B(x-\xi) \cdot \alpha^{-1}(\xi) \cdot \left\{ \int_0^l B(\xi-\eta) q(\eta) d\eta \right\} + \\
 &+ C_3 \cdot \int_0^l B(x-\xi) \cdot \alpha^{-1}(\xi) \cdot \xi \cdot d\xi + \\
 &+ C_2 \cdot \int_0^l B(x-\xi) \cdot \alpha^{-1}(\xi) d\xi + C_1 \cdot x + C_0.
 \end{aligned} \quad (41)$$

Здесь и далее функция $B(x-\xi)$ дается выражением (33). Заметим, что

$$B'_x(x-\xi) = e(x-\xi). \quad (42)$$

Далее нам понадобятся производные функции прогибов. С учетом равенств (42) и (41) из интеграла (41) имеем

$$\begin{aligned}
 y'(x) &= \int_0^x \alpha^{-1}(\xi) \cdot \left\{ \int_0^l B(\xi-\eta) \cdot q(\eta) d\eta \right\} d\xi + \\
 &+ C_3 \cdot \int_0^x \alpha^{-1}(\xi) \cdot \xi \cdot d\xi + C_2 \cdot \int_0^x \alpha^{-1}(\xi) d\xi + C_1.
 \end{aligned} \quad (43)$$

Найдем вторую и третью производные:

$$\begin{aligned}
 y''(x) &= \alpha^{-1}(x) \cdot \int_0^l B(\xi-\eta) \cdot q(\eta) d\eta + \\
 &+ C_3 \cdot \alpha^{-1}(x) \cdot x + C_2 \cdot \alpha^{-1}(x).
 \end{aligned} \quad (44)$$

$$\begin{aligned}
 y'''(x) &= \left[\frac{1}{\alpha(x)} \right]' \cdot \int_0^l B(x-\eta) \cdot q(\eta) d\eta + \alpha^{-1}(x) \cdot \int_0^x q(\eta) d\eta + \\
 &+ C_3 \cdot \left\{ \left[\alpha^{-1}(x) \right]' \cdot x + \alpha^{-1}(x) \right\} + C_2 \left[-\alpha^{-1}(x) \right]'.
 \end{aligned} \quad (45)$$

Теперь изгибающие моменты $M(x)$ и поперечные силы $Q(x)$ легко выразить через производные функции прогибов:

$$M(x) = -\alpha(x) \cdot y''(x), \quad (46)$$

$$Q(x) = \frac{dM}{dx} = -\alpha'(x) \cdot y''(x) - \alpha(x) \cdot y'''(x).$$

Во всех предыдущих выражениях (41) - (46) переменные $x, \xi: \in [0; l]$.

Располагая общим интегралом (41) и пользуясь методами, изложенными в предыдущих главах, можно построить алгоритмы для исследования напряженно-деформированного состояния многопролетных балок с переменной жесткостью. При этом для перехода к основной системе не требуется вводить, как ранее, расширенную область.

Обсуждение результатов. Рассмотрим простейший пример. Пусть двухпролетная балка с переменной жесткостью $\alpha(x)$ загружена нагрузкой $q_0(x)$ (рис.2 а). Необходимо построить алгоритм, позволяющий исследовать на компьютере напряженно-деформированное состояние балки.

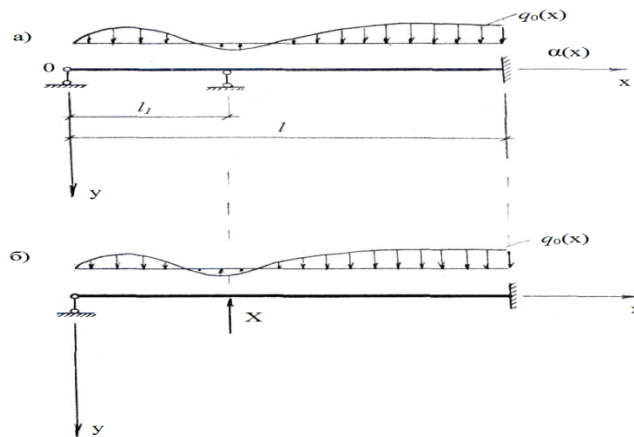


Рис. 2 - Схемы заданной (а) и основной (б) систем

Fig. 2 - Schemes of the given (a) and main (b) systems

Перейдем от заданной системы (рис.2 а) к основной (рис.2 б). Сохранив без изменения условий крепления крайних опор (без введения расширенной области!), заменим промежуточную опору ее реакцией X .

В основной системе (рис.2 б) нагрузка записывается в виде

$$q(x) = q_0(x) - X \cdot \delta(x - l_1). \quad (47)$$

Далее воспользуемся общим решением (41). Подставляя функцию (48) в подынтегральное выражение (41), получаем

$$\begin{aligned} y(x) = & \int_0^l B(x-\xi) \cdot \alpha^{-1}(\xi) \cdot \left\{ \int_0^l B(\xi-\eta) \cdot [q_0(\eta) - \right. \\ & \left. - X \cdot \delta(\eta - l_1)] d\eta \right\} d\xi + \\ & + C_3 \cdot \int_0^l B(x-\xi) \cdot \alpha^{-1}(\xi) \cdot \xi d\xi + \\ & + C_2 \cdot \int_0^l B(x-\xi) \cdot \alpha^{-1}(\xi) d\xi + C_1 \cdot x + C_0. \end{aligned} \quad (48)$$

С учетом фильтрующих свойств дельта-функции интеграл (49) упростим:

$$y(x) = y_0(x) - X \cdot y_4(x) + C_3 \cdot y_3(x) + C_2 \cdot y_2(x) + C_1 \cdot x + C_0. \quad (49)$$

Здесь введены следующие обозначения:

$$\begin{aligned} y_0(x) &= \int_0^l B(x - \xi) \cdot \alpha^{-1}(\xi) \cdot \left\{ \int_0^l B(\xi - \eta) \cdot q_0(\eta) d\eta \right\} d\xi, \\ y_4(x) &= \int_0^l B(x - \xi) \cdot \alpha^{-1}(\xi) \cdot B(\xi - l_1) d\xi, \\ y_3(x) &= \int_0^l B(x - \xi) \cdot \alpha^{-1}(\xi) \cdot \xi d\xi, \\ y_2(x) &= \int_0^l B(x - \xi) \cdot \alpha^{-1}(\xi) d\xi. \end{aligned} \quad (50)$$

В выражение для прогиба (50) входят пять неизвестных:

$$X, C_0, C_1, C_2, C_3.$$

Для их определения имеем четыре условия крепления балки на крайних опорах и одно условие – на промежуточной опоре (рис. 2 а). В соответствии с расчетной схемой (рис. 2 а) эти пять условий запишем так:

$$\begin{cases} y(0) = 0, \\ y''(0) = 0, \\ y(l) = 0, \\ y'(l) = 0, \\ y(l_1) = 0. \end{cases} \quad (51)$$

Подставив функцию (50) в условия (49), можно получить систему пяти уравнений, из которой нетрудно найти неизвестные X, C_0, C_1, C_2, C_3 . После чего прогибы вычисляются с помощью выражения (50), а внутренние усилия – соотношениями (46). При этом, выполняя над функциями (51) операции дифференцирования и интегрирования, следует пользоваться свойством (42). Процесс итераций сходится достаточно быстро. Для практических расчетов достаточно ограничиться первыми двумя приближениями.

Вывод. Результатами проведенного исследования являются:

1. Даны дифференциальные уравнения поперечного изгиба балок с учетом физических и геометрических нелинейностей конструкции;
2. Отмечается, что при расчете балочных конструкции встречаются три типа нелинейностей: физическая нелинейность, геометрическая нелинейность и конструктивная нелинейность. Геометрическая нелинейность проявляется в основном в балочных конструкциях (не только в балочных конструкциях), если конструкция гибкая и развивается под действием внешних нагрузок большие прогибы (перемещения);
3. В практике проектирования и строительства чаще всего приходится иметь дело с физическим, конструктивным и геометрическим нелинейностям. В данной статье внимание уделяется физическим и геометрическим нелинейностям;
4. Рассмотрены нелинейные задачи балочных конструкции, которые чаще всего встречаются при проектировании реальных балок;
5. Подробно рассмотрены балочные конструкции, материал которых не следует закону Гука. Даны соответствующие уравнения и примеры;
6. Дан алгоритм решения для балки с переменной жесткостью, который позволяет построить классическое решение;

Представленные в статье нелинейные расчетные модели могут найти применение в практике проектирования и строительства балочных конструкции.

Библиографический список:

1. Байков В.Н., Сигалов Э.Е. Железобетонные конструкции /общий курс/. Издательство «Стройиздат», Москва, 1991г. 970 стр.
2. Беляева Н.М. Сопротивление материалов. Издательство «Наука», Москва, 1976г., 607 стр.
3. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов. Издательство «Наука», Москва, 1986г., 544 стр.
4. Вайнберг М.М. Вариационные методы исследования нелинейных операторов. «Наука». М., 1969 г.
5. Демидович Б.П., Марон И.А., Шувалова Э.З. Численные методы анализа. Издательство «Наука», Москва, 1967г., 368 стр.
6. Зельдович Я.Б., Мышкис А.Д. Элементы прикладной математики. «Наука», М., 1965 г.
7. Крылов Н.М., Боголюбов Н.Н. Введение в нелинейную механику, изд-во АН УССР, 1937 г.
8. СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия». Свод правил – Москва, Стандартинформ, 2016. – 95 с.,
9. СП 16.13330.2017 «Стальные конструкции». Свод правил – Москва, Стандартинформ, 2017. – 126 с.
10. СП 128.13330.2016 «Алюминиевые конструкции». Свод правил – Москва, Стандартинформ, 2016. – 86 с.
11. СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции». Свод правил – Москва Стандартинформ 2019. – 126 с

References:

1. Baykov V.N., Sigalov E.E. Reinforced concrete structures /general course/. *Stroyizdat Publishing House*, Moscow, 1991;970 p.(In Russ)
2. Belyaeva N.M. Strength of materials. Nauka Publishing House, Moscow, 1976;607 p. (In Russ)
3. Bronstein I.N., Semendyaev K.A. Handbook of mathematics for engineers and university students. *Nauka Publishing House*, Moscow, 1986;544 p.(In Russ)
4. Weinberg M.M. Variational methods for studying nonlinear operators. *Nauka*. Moscow, 1969.(In Russ)
5. Demidovich B.P., Maron I.A., Shuvalova E.Z. Numerical methods of analysis. *Nauka Publishing House*, Moscow, 1967;368 p. (In Russ)
6. Zeldovich Ya.B., Myshkis A.D. Elements of Applied Mathematics. *Nauka*, Moscow, 1965.(In Russ)
7. Krylov N.M., Bogolyubov N.N. Introduction to Nonlinear Mechanics, Publishing House of the Academy of Sciences of the Ukrainian SSR, 1937.
8. SP 20.13330.2016 "Loads and Impacts". Code of Practice - *Moscow, Standartinform*, 2016; 95 p. (In Russ)
9. SP 16.13330.2017 "Steel Structures". Code of Practice - *Moscow, Standartinform*, 2017; 126 p. (In Russ)
10. SP 128.13330.2016 "Aluminum Structures". Code of Practice – *Moscow, Standartinform*, 2016; 86 p.(In Russ)
11. SP 63.13330.2018 “Concrete and Reinforced Concrete Structures”. Code of Practice – *Moscow Standartinform* 2019; 126 p..(In Russ)

Сведения об авторах:

Абусупян Курашевич Юсупов, доктор технических наук, профессор, кафедра «Строительные конструкции и гидротехнические сооружения»; hairulla213@mail.ru

Хайрулла Магомедмуратович Муселемов, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Строительные конструкции и гидротехнические сооружения»; hairulla213@mail.ru

Раджаб Исабекович Вишталов, кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительные конструкции и гидротехнические сооружения»; hairulla213@mail.ru

Information about the authors:

Abusupyan K. Yusupov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Department of Building Structures and Hydraulic Structures; hairulla213@mail.ru

Hairulla M. Muselemov, Dr. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Head of the Department of Building Structures and Hydraulic Structures; hairulla213@mail.ru

Rajab I. Vishtalov, Cand.Sci. (Eng.), Assoc. Prof. Department of Building Structures and Hydrotechnical Structures; hairulla213@mail.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 01.02.2025.

Одобрена после рецензирования/ Reviced 30.03.2025.

Принята в печать/Accepted for publication 14.05. 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 Microsoft Word. Статья должна предусматривать разделы: «Введение», «Постановка задачи», «Методы исследования», «Обсуждение результатов», «Вывод». Объем непосредственно содержания статьи должен составлять не менее 9-10 страниц машинописного текста. Формулы подготавливаются во встроенном редакторе формул Microsoft Word или в редакторе MathType. Шрифтовое начертание обозначений в формулах, в таблицах и в основном тексте должно быть полностью идентичным. Ссылки на формулы и таблицы даются в круглых скобках, ссылки на использованные источники (литературу) - в квадратных скобках. Формат бумаги А4. Параметры страницы: поля - левое 3 см, верхнее и нижнее 2 см, правое 1,5 см; колонтитулы отсутствуют.

Элементы заглавия публикуемого материала

УДК; Перечень авторов (разделяется запятыми, инициалы после фамилий, на русском и английском языке); выравнивание по центру. Название статьи (на русском и английском языке). Резюме (Abstract) – 200-250 слов, характеризующих содержание статьи (на русском и английском языке). Ключевые слова (keywords) 5-10 слов или словосочетаний, отражающих содержание статьи (на русском и английском языке). Каждый элемент заглавия приводится, начиная с новой строки; выравнивание проводится по центру. **Основной текст** Шрифт TimesNewRoman 12 pt, выравнивание по ширине, первая строка с отступом 1,25 см, межстрочный интервал - 1.

Библиографический список

В статье указывается строка с текстом «**Библиографический список**». Библиографический список на русском языке выполняется по ГОСТ Р 7.0.5 -2008. Библиографический список должен составлять не менее 15 наименований источников литературы, среди которых от 30-70 % ссылок на иностранные источники. Ссылки на неопубликованные работы не допускаются. Обязательно цитирование современных работ, изданных по тематике статьи за последние 5 лет. Доля ссылок на статьи авторов рукописи, изданных ранее, не должна превышать 20% от общего количества ссылок. Библиографический список обязательно должен быть переведен на английский язык. «References» должен быть составлен по стандарту «Ванкувер». Ссылки на материалы, размещенные на электронных носителях, следует допускать в крайнем случае. Редакция оставляет за собой право потребовать от автора замены ссылки, если на момент обработки статьи по указанному адресу материал будет отсутствовать.

Справка об авторах

Включает для каждого автора фамилию, имя, отчество (полностью), ученую или академическую степень, ученое звание, ORCID, название и полный адрес места работы. Обязательно указывается адрес электронной почты. Сведения представляются на русском и английском языках.

Верстка формул, рисунков, таблиц

Формулы подготавливаются во встроенном редакторе формул Microsoft Word или в редакторе MathType; нумеруются только те формулы, на которые есть ссылки в тексте статьи; использование при нумерации букв и других символов не допускается. Выписанные в отдельную строку формулы выравниваются по середине строки, номер заключается в круглые скобки и выравнивается по правому краю текста. Все впервые встречающиеся в формуле обозначения должны быть расшифрованы сразу после формулы. Рисунки, представляющие собой графики, схемы и т. п., должны быть выполнены в графических векторных редакторах (встроенный редактор Microsoft Word, CorelDraw, Microsoft Visio и т. п.). Использование точечных форматов (.bmp, .jpeg, .tif, .html) допустимо только для рисунков, представление которых в векторных форматах невозможно (фотографии, копии экрана монитора и т. п.). Название рисунка указывается на русском и английском языках. Таблица состоит из следующих элементов: нумерационного заголовка (слова «Таблица» и ее номера арабскими цифрами); шапки (заголовочной части), включающей заголовки граф (объясняют значение данных в графах); боковика (первой слева графы) и прографки. Название таблицы указывается на русском и английском языках.

Требования к рецензированию и хранению рецензий научных статей, поступивших в редакцию журнала

Научная статья, поступившая в редакцию журнала, рассматривается ответственным редактором на соответствие тематике и направлениям журнала, правилам оформления и наличие сопроводительных документов. Редакция осуществляет рецензирование всех поступающих в редакцию материалов, с целью их экспертной оценки. Все рецензенты являются признанными специалистами по тематике рецензируемых материалов. Рецензии хранятся в редакции издания в течение 5 лет. При поступлении соответствующего запроса редакция вправе направлять копии рецензий в Министерство науки и высшего образования РФ.

План-график издания журнала

Выпуск 1 (март) – прием статей до 31 декабря предыдущего года; Выпуск 2 (июнь) – прием статей до 31 марта текущего года; Выпуск 3 (сентябрь) – прием статей до 30 июня текущего года; Выпуск 4 (декабрь) – прием статей до 30 сентября текущего года. Редакция оставляет за собой право производить редакционные изменения, не искажающие основное содержание статьи. Статьи, не отвечающие правилам оформления, к рассмотрению не принимаются. Рукописи и электронные носители авторам не возвращаются. Датой поступления считается день получения редакцией окончательного текста статьи. Адрес редакционного совета: 367015, РД, г. Махачкала, пр. И. Шамилля, 70, ФГБОУ ВО «ДГТУ», Учебно-лекционный корпус 2, редакция журнала «Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки». Технические вопросы можно выяснить по электронному адресу: aidesetova@rambler.ru и по телефону 8(8722)62-39-64, +79280504268

FORMATTING REQUIREMENTS FOR PAPERS

Electronic copies are used when laying out the journal. Computer processing is used for line and halftone (grayscale) graphics. The journal is produced by offset printing technology. Therefore, the following should be submitted to the editor: a printout of the manuscript (2 copies.); the printout should be a hard copy of the electronic article file; electronic copy (e-mail is acceptable); an expert opinion supporting the article's suitability for publication (1 copy); Information about authors: Name, place of work, academic rank, position.

Guidance for the preparation of texts

The text should be prepared in Microsoft Word. The article must include sections entitled: "Introduction", "Background", "Methods", "Results and Discussion", "Conclusion". The article itself is supposed to comprise at least 9-10 if typewritten pages. Formulae should be prepared in Microsoft Word's built-in equation editor or MathType. Font symbols used in formulae, tables and in the main text must be completely identical. References to formulae and tables are given in round brackets; references to the sources referred to (literature) – in square brackets. Paper size – A4. Page setup: margins – left 3 cm, top and bottom – 2 cm, right – 1.5 cm; no headers or footers. **Elements of the title of the published material** UDC / LBC; List of authors (separated by commas; initials after surnames; in Russian and English); alignment *right*. Title of the article (in Russian and English). Abstract – 200-250 words or characters describing the content of the article (in Russian and English). Keywords – 5-10 words or phrases that reflect the content of the article (in Russian and English). Each title element should start on a new line; aligned centre. **Body text**. Font TimesNewRoman 12 pt, full justification, first line with 1.25 cm indentation, line spacing – 1.

Bibliography

The bibliography list should be entitled References. References in Russian prepared according to GOST R 7.0.5 -2008.

The reference list is considered to include at least 20 names of literature sources, including 30–70% of references to foreign sources. References to unpublished works are not permitted. Only recent works on the subject of the article published within the past 5 years should be cited. The proportion of references to articles previously published by the authors should not exceed 20% of the total number of references. The bibliography must be translated into English. "References" should be drawn up according to the "Vancouver" standard. Please indicate your chosen standard when formulating the bibliography. Links to material on electronic media shall be allowed as a last resort. The editors reserve the right to require a replacement reference from the author if an item is absent at a specified address at the time of processing of the article.

Information about authors

For each author, the following information should be provided: first name, middle name (or patronymic) and last name, scientific or academic degree, academic title, brief academic biography (no more than 5-6 lines), name and full address of place of work. The specification of an email address is mandatory.

Composition of formulas. Layout of figures. Layout of tables

Formulas should be prepared in the built Microsoft Word equation editor or MathType Editor; only those formulas that are referenced in the text should be numbered; the use of letters or other characters is not permitted when enumerating equations. Formulas written out on a separate line are aligned to the middle of the line; their respective numbers shall be in parentheses and right-aligned. All symbols occurring in the formula for the first time must be decoded immediately after the formula.

Drawings, consisting of graphs, charts, etc. should be prepared in graphic vector editors (the internal editor of Microsoft Word, CorelDraw, Microsoft Visio etc.). The use of bitmap formats (.bmp, .jpeg, .tif) is only permissible for graphics whose presentation is not possible in vector formats (photos, screenshots, etc.).

A table should consist of the following elements: numerical title (the word "Table" and its number in Arabic numerals); title (header section) including column headings (explaining the meaning of the data in the columns); side heading (the first column on the left) and the table body (the other columns of the table).

Reviewing requirements for and saving of scientific article reviews, received by the journal editorial staff

A scientific article received by the editorial office is considered by the responsible editor in terms of its compliance with topics and directions of the magazine, formatting guidelines and availability of supporting documents. The editorial staff carries out a review of all incoming materials to the editor with a view to peer review. All reviewers are acknowledged experts on the topic of the peer-reviewed material. Reviews are stored at the editorial office for 5 years. On receipt of a proper request, editorial staff have the right to submit copies of reviews to the RF Ministry of Education and Science.

Publication schedule

Issue 1 (March) – articles accepted until 31 December of the previous year; Issue 2 (June) – articles accepted until March 31 of the present year; Issue 3 (September) – articles accepted until 30 June of the present year; Issue 4 (December) – articles accepted until September 30 of the present year; The Editorial Board reserves the right to make editorial changes which do not distort the main content of the article. Articles that do not conform to formatting guidelines will not be taken into consideration. Manuscripts and electronic media will not be returned. The date of acceptance shall be deemed to be the date of receipt of the final text by the editorial board. Address of the editorial board: 70 Imama Shamiyeva 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: aidesetova@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– № 2 – 2025.

**HERALD
OF DAGHESTAN STATE TECHNICAL UNIVERSITY. TECHNICAL SCIENCES**
Makhachkala, Volume 52, No. 2. 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 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 15.07.2025г. Сдано в печать 22.07.2025г.

Формат 60x84 ¹/₈. Гарнитура «Times». Бумага офсетная

Тираж 500. Усл. п.л. 28.83 Уч. изд.л. 20.52

Заказ № 2207

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