

**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 50, № 4, 2023.**

# ВЕСТНИК

ДАГЕСТАНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА.

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

**Volume 50, No.4, 2023.**

# 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», 2023.

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: CrossRef; 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.

**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 50, № 4, 2023**

**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: Мелехин В.Б., д.т.н., профессор ДГТУ, Махачкала, 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 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.

Батдалов М.М., д.т.н., член-корр. Российской академии архитектуры и строительных наук, профессор ДГТУ, Махачкала, РФ.

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

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

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

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

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](https://orcid.org/0000-0001-7363-1071)

Сопредседатели:

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

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

Члены редакционного совета:

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

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

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

**Группы научных специальностей**

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

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

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

2.3.4. Управление в организационных системах (технические науки)

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

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

2.3.7. Компьютерное моделирование и автоматизация проектирования (технические науки)

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

2.1.5. Строительные материалы и изделия (технические науки),

2.1.9. Строительная механика (технические науки).

Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. Том 50, № 4 Махачкала, 2023. 212с.

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

Адрес учредителя и издателя 367026, РД, г. Махачкала, пр. И.Шамиля, 70, ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет». Тел./факс (8722)623715; (8722)623964 e-mail: [vestnik.dgtu@mail.ru](mailto:vestnik.dgtu@mail.ru) Website: <http://vestnik.dgtu.ru/>

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Энергетика и электротехника.....</b>	<b>6</b>
М.А. Воронцов, В.Ю. Глазунов, А.С. Грачев, М.С. Машталир, С.А. Поспелов, А.В. Чернышев. Анализ методов моделирования режимов работы компрессорного оборудования, обеспечивающего работу промышленных установок низкотемпературной сепарации.....	6
А.С. Зайцев, М.В. Шамаров, Р.А. Жлобо, Е.О. Ивченко. Расчет теплоутилизатора с использованием тепловых труб в системе утилизации тепла вытяжного воздуха.....	17
М.В. Шамаров, Е.Г. Степанова, А.В. Колинько, А.М. Шамаров. Перспективы применения мембранной холодильной установки для производства холода как альтернатива абсорбционной.....	26
<b>Информационные технологии и телекоммуникации.....</b>	<b>37</b>
Ф.В. Абилова, М.В. Абилов, Э.В. Селимханов. Построение параллельных интерполяторов на C++.....	37
А.Д. Байдалин. Метод оптимизации инвестиционного пакета на основе портфельной теории Марковица.....	51
А.Ю. Безрученко, В.А. Егунов. Исследование эффективности методов оптимизации программ для параллельных вычислительных систем с GPU.....	59
О.И. Бокова, С.В. Канавин, Н.С. Хохлов, И.В. Гилев, Л.А. Лекарь. К вопросу обеспечения защищенного доступа к информационным системам с применением биометрической аутентификации на основе нечеткого образа личности пользователя и нейросетевых преобразований.....	75
И.Г. Дровникова, А.Д. Попова. Способы оценки уровня защищенности программного обеспечения автоматизированных систем органов внутренних дел и направления их совершенствования.....	85
А.И. Дубровина, Мустафа Х. Алкорди. Разработка методов нейтрализации угроз «нулевого дня».....	93
А.О. Ефимов, И.И. Лившиц, М.О. Мещеряков, Е.А. Рогозин, В.Р. Романова. Об отдельных аспектах стандартизации и условий функционирования автоматизированных систем.....	101
А.М. Конаков, А.Г. Певнева. Динамическое моделирование при функционировании систем защиты в области обеспечения информационной безопасности.....	109
С.И. Носков, С.И. Белинская. Вычисление оценок параметров однородной вложенной кусочно-линейной регрессии.....	115
А.В. Олейникова, А.А. Олейников. Модель интеллектуального анализа данных для исследования системы квот вылова водных биологических ресурсов.....	121
В.В.Ткач, Г.О. Магомедов, А.А Шевцов. Численно-аналитическое решение распределения температур во вспененной суспензии в процессе вакуумной СВЧ – сушки.....	129
О.В. Толстых, О.В. Исаев. Методы и алгоритмы интеллектуальной поддержки при принятии управленческих решений в реализации задач охранно-тревожной сигнализации на объектах особой важности.....	139
Д.О. Трофимов, М.С. Шепелев, С. А. Резниченко. Организация реагирования на инциденты информационной безопасности.....	148
Л.А. Щенявская, Д.А. Гура, Р.А. Дьяченко. Анализ архитектуры нейронной сети PointNet.....	158
<b>Строительство и архитектура.....</b>	<b>166</b>
Е.С. Аралов, Б.М. Кумицкий. CFD-анализ воздушных потоков и температур на базе газолучистого отопления в промышленных условиях.....	166
М.А. Высоцкая, А.В Курлыкина, В.А. Токарев. Использование битуминозных пород и природных битумов с точки зрения геоники.....	175
М.Ш. Гатиев, Б.М. Языев, Ю.П. Иванова, С.В. Ключев. Ползучесть замкнутого цилиндрического резервуара при гидростатическом давлении.....	184
Х.П. Культербаев, М.М. Пайзулаев. Устойчивость сжато-растянутого стержня переменного сечения при комбинированном нагружении.....	191
С.-А. Ю. Муртазаев, С. Г. Шеина, М.С. Сайдумов, И. С.-А. Муртазаев. Современные бетонные композиты для сейсмостойкого строительства.....	197
В.Н. Шалимов, А.В. Цыбенко, И.Н. Гоглев, С.А. Логинова. Исследование герметичности одинарных швов ПВХ-мембран LOGICBASE™/ECOBASE™ в системах инженерной гидроизоляции.....	203
<b>Требования к оформлению статей.....</b>	<b>210</b>

Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation

Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education «Daghestan State Technical University»

HERALD OF DAGHESTAN STATE TECHNICAL UNIVERSITY. TECHNICAL SCIENCES. V o l u m e 5 0 , N o . 4 , 2 0 2 3 .

<p><b>Editor-in-Chief:</b> Rasul M. Aliev, Dr. Sci. (Eng.), Professor., Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; https://orcid.org/0000-0002-3061-4121</p> <p><b>Deputy Editor:</b> Aida M. Esetova, Dr. Sci. (Econom.), Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; https://orcid.org/0000-0003-1093-5507</p> <p><b>Editorial Board:</b></p> <p><b>Scientific rubric «Energy and Electrical Engineering»</b></p> <p><b>Executive editor:</b> Oleg V. Evdulov, Dr. Sci. (Eng.), Assoc. 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. Kobzarenko, 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. Krugljakov, 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;</p> <p><b>Scientific rubric «Information Technology and Telecommunications»</b></p> <p><b>Executive editor:</b> Vladimir B. Melekhin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, 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.</p> <p><b>Scientific rubric «Building and architecture»</b></p> <p><b>Executive editor:</b> Gadzhimurad N. Khadzhisalopov, 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; Muhtaridin M. Batdalov, Dr. Sci. (Eng.), Corresponding member of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, 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;</p> <p><b>Editorial council</b></p> <p><b>Chairman of the editorial council:</b> Boris A. Yakimovich, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia.</p> <p><b>The co-chairs of the editorial council:</b> 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;</p> <p><b>Members of the Editorial Board:</b> 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;</p>	<p><b>Research areas</b></p> <p>2.4.8. Machines and devices, processes of refrigeration and cryogenic equipment (Technical Sciences),</p> <p>2.3.1. System analysis, management and information processing (Technical Sciences),</p> <p>2.3.3. Automation and management of technological processes and production (Technical Sciences),</p> <p>2.3.4. Management in organizational systems (Technical Sciences),</p> <p>1.2.2. Mathematical modeling, numerical methods and program complexes (Technical Sciences),</p> <p>2.3.6. Methods and systems for information security, information security (Technical Sciences),</p> <p>2.3.7. Computer modeling and design automation (Technical sciences)</p> <p>2.1.3. Heat supply, ventilation, air conditioning, gas supply and lighting (Technical Sciences),</p> <p>2.1.5. Building materials and products (Technical Sciences),</p> <p>2.1.9. Construction mechanics (Technical Sciences).</p> <p>Herald of Daghestan State Technical University. Technical Science. Vol. 50, No.4 Makhachkala, 2023–212p.</p> <p>Published by Decision of the Academic Council Daghestan State Technical University Edition and Publisher Address: 70 I. Shamil Ave., Makhachkala, the Republic of Daghestan 367026, Russia. Daghestan State Technical University Tel./fax (8722)623715 (8722)623964</p>
---	--

**CONTENTS**

<b>Energy and Electrical Engineering</b> .....	<b>6</b>
M.A. Vorontsov, V.Yu. Glazunov, A.S. Grachev, M.S. Mashtalir, S.A. Pospelov, A.V. Chernyshev. Analysis of methods for modeling operating modes of compressor equipment that ensures the operation of field low-temperature separation units.....	6
A.S. Zaitsev, M.V. Shamarov, R.A. Zhlobo, E.O. Ivchenko. Calculation of a heat exchanger using heat pipes in the Exhaust air heat Recovery System.....	17
M.V. Shamarov, E.G. Stepanova, A.V. Kolinko, A.M. Shamarov. Prospects for the use of a membrane refrigeration unit for the production of cold as an alternative to absorption.....	26
<b>Information Technology and Telecommunications</b> .....	<b>37</b>
F.V. Abilova, M.V. Abilov, E.V. Selimkhanov. Construction of parallel one-dimensional interpolators in C++.....	37
A.D. Baydalin. Investment package optimization method based on the Markowitz portfolio theory.....	51
A.Y. Bezruchenko, V.A. Egunov. Investigation of the Effectiveness of Programs Optimization Methods for Parallel Computing Systems with GPU.....	59
O.I. Bokova, S.V. Kanavin, N.S. Khokhlov, I.V. Gilev, L.A. Lekar. On the issue of ensuring secure access to information systems using biometric authentication based on a fuzzy image of the user’s identity and neural network transformations.....	75
I.G. Drovnikova, A.D. Popova. Methods for assessing the level of security of software of automated systems of internal affairs bodies and directions for their improvement.....	85
A.I. Dubrovina, Mustafa H. Alcordi. Development of methods for neutralizing «Zero-day» threats.....	93
A.O. Efimov, I.I. Livshits, M.O. Meshcheryakov, E.A. Rogozin, V.R. Romanova. On certain aspects of standardization and operating conditions of automated systems.....	101
A.M. Konakov, A.G. Pevneva. Dynamic modeling in the functioning of security systems in the field of information security.....	109
S.I. Noskov, S.I. Belinskaya. Computing Parameter Estimates of a Homogeneous Nested Piecewise Linear Regression.....	115
A.V. Oleynikova, A.A. Oleynikov. Data mining model for the study of the system of quotas for the catch of aquatic biological resources.....	121
V.V. Tkach, G.O. Magomedov, A.A. Shevtsov. Numerical and analytical solution of temperature distribution in foamed soy suspension during vacuum microwave drying.....	129
O.V. Tolstykh, O.V. Isaev. Methods and algorithms of intellectual support in making managerial decisions in the implementation of security alarm tasks at objects of special importance.....	139
D.O. Trofimov, M.S. Shepelev, S.A. Reznichenko. Organization of response to information security incidents....	148
L.A. Schenyavskay, D.A. Gura, R.A. Dyachenko. Analysis of the PointNet neural network architecture.....	158
<b>Building and Architecture</b> .....	<b>166</b>
E.S. Aralov, B.M. Kumicki. CFD analysis of air flows and temperatures based on radiant heating in industrial environments.....	166
M.A. Vysotskaya, A.V. Kurlykina, V.A. Tokarev. The use of bituminous rocks and natural bitumens from a geonic point of view.....	175
M.Sh. Gatiev, B.M. Yazyev, Yu.P. Ivanova, S.V. Klyuev. Creep of a closed cylindrical tank at hydrostatic pressure.....	184
H.P. Kulterbaev, M.M. Paizulaev. Stability of a compressed-tensioned rod of variable cross-section with combined loading.....	191
S.-A. Yu. Murtazaev, S. G. Sheina, M.S. Saidumov, I. S.-A. Murtazaev. Modern concrete composites for earthquake-resistant construction.....	197
V.N. Shalimov, A.V. Tsybenko, I.N. Goglev, S.A. Loginova. Study of the tightness of single seams of LOGICBASE™ / ECOBASE™ PVC membranes in engineering waterproofing systems.....	203
<b>Formatting requirements for papers</b> .....	<b>210</b>

ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА  
ENERGY AND ELECTRICAL ENGINEERING

УДК 621.515

DOI: 10.21822/2073-6185-2023-50-4-6-16



Оригинальная статья /Original article

**Анализ методов моделирования режимов работы компрессорного оборудования, обеспечивающего работу промышленных установок низкотемпературной сепарации**

**М.А. Воронцов<sup>1-3</sup>, В.Ю. Глазунов<sup>4</sup>, А.С. Грачев<sup>1,3</sup>,  
М.С. Машталир<sup>5</sup>, С.А. Поспелов<sup>5</sup>, А.В. Чернышев<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> ООО «Газпром ВНИИГАЗ»,

<sup>1</sup>195112, г. Санкт-Петербург, пр. Малоохтинский, д.45, литера А, 2-Н, офис 812, Россия,

<sup>2</sup> Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,

<sup>2</sup>105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, с. 1, Россия,

<sup>3</sup> Национальный исследовательский университет ИТМО,

<sup>3</sup>197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49, Россия,

<sup>4</sup> ООО «Газпром добыча Надым»,

<sup>4</sup>629736, г. Надым, ул. Пионерская, стр. 14, Россия,

<sup>5</sup> ООО «Газпром трансгаз Санкт-Петербург»,

<sup>5</sup>196128, г. Санкт-Петербург, ул. Варшавская, д. 3, к. 2, литера Б, Россия

**Резюме. Цель.** Дожимная компрессорная станция (ДКС) является одним из ключевых технологических объектов, необходимых для обеспечения эффективной работы технологии низкотемпературной сепарации природного газа в промышленных системах подготовки газа к транспортировке. Обеспечение перспективных режимов работы ДКС с высокой эффективностью является актуальной задачей. **Метод.** Одним из инструментов решения этой задачи является математическое моделирование режимов работы центробежных компрессоров (далее – ЦБК), входящих в состав газоперекачивающих агрегатов (ГПА). Основой математической модели является газодинамическая характеристика (ГДХ) ЦБК. В существующей нормативной документации представлены упрощенные способы моделирования ГДХ, которые подходят для низконапорных ЦБК с отношением давлений до 1,5 и количеством ступеней сжатия не более трех, но не подходят для многоступенчатых высоконапорных ЦБК. **Результат.** Представлены результаты сравнения трех способов моделирования ГДХ (метод приведенных характеристик, уточненный метод приведенных характеристик, метод двухпараметрической аппроксимации) высоконапорных ЦБК на примере ЦБК с отношением давлений до 2,0, предназначенного для оснащения газоперекачивающего агрегата в составе промышленных ДКС. Проведен анализ и сопоставление полученных результатов моделирования с фактическими данными. **Вывод.** При применении метода моделирования УМПХ-2D получены наименьшие погрешности (не более 2,0 %), что, в свою очередь, свидетельствует о его наибольшей точности среди рассмотренных методов пересчета ГДХ высоконапорных и многоступенчатых компрессоров.

**Ключевые слова:** высоконапорные центробежные компрессоры, моделирование центробежных компрессоров, метод приведенных характеристик, установки низкотемпературной сепарации

**Для цитирования:** М.А. Воронцов, В.Ю. Глазунов, А.С. Грачев, М.С. Машталир, С.А. Поспелов, А.В. Чернышев. Анализ методов моделирования режимов работы компрессорного оборудования, обеспечивающего работу промышленных установок низкотемпературной сепарации. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023; 50(4):6-16. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-4-6-16

## Analysis of methods for modeling operating modes of compressor equipment that ensures the operation of field low-temperature separation units

M.A. Vorontsov<sup>1-3</sup>, V.Yu. Glazunov<sup>4</sup>, A.S. Grachev<sup>1,3</sup>, M.S. Mashtalir<sup>5</sup>,  
S.A. Pospelov<sup>5</sup>, A.V. Chernyshev<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Gazprom VNIIGAZ LLC,

<sup>1</sup> 45 Malookhtinsky Ave., letter A, 2-N, office 812, St. Petersburg 195112, Russia,

<sup>2</sup> N.E. Bauman Moscow State Technical University,

<sup>2</sup> 2nd Baumanskaya St. 5, p.1, Moscow 105005, Russia,

<sup>3</sup> National Research University ITMO,

<sup>3</sup> 49 Kronverksky Ave., St. Petersburg 197101, Russia,

<sup>4</sup> Gazprom Dobycha Nadym LLC,

<sup>4</sup> Pionerskaya St., build. 14, Nadym 629736, Russia,

<sup>5</sup> LLC Gazprom Transgaz St. Petersburg,

<sup>5</sup> 3 Varshavskaya St., build.2, letter B, St. Petersburg 196128, Russia

**Abstract. Objective.** A booster compressor station (BCS) is one of the key technological facilities necessary to ensure the effective operation of low-temperature separation technology for natural gas in field gas preparation systems for transportation. Ensuring promising operating modes of booster compressor stations with high efficiency is an urgent task. **Method.** One of the tools for solving this problem is mathematical modeling of the operating modes of centrifugal compressors (hereinafter - CPC), which are part of gas pumping units (GPU). The basis of the mathematical model is the gas dynamic characteristic (GDC) of the pulp and paper mill. The existing regulatory documentation presents simplified methods for modeling HDC, which are suitable for low-pressure pulp and paper mills with a pressure ratio of up to 1.5 and the number of compression stages of no more than three, but are not suitable for multi-stage high-pressure pulp and paper mills. **Result.** The results of a comparison of three methods of modeling the hydrodynamic characteristics (method of reduced characteristics, refined method of reduced characteristics, method of two-parameter approximation) of high-pressure pulp and paper mills are presented using the example of a pulp and paper mill with a pressure ratio of up to 2.0, intended for equipping a gas pumping unit as part of field booster compressor stations. An analysis and comparison of the obtained modeling results with actual data was carried out. **Conclusion.** When using the UMPH-2D modeling method, the smallest errors were obtained (no more than 2.0%), which, in turn, indicates its highest accuracy among the considered methods for recalculating the gas flow characteristics of high-pressure and multi-stage compressors.

**Keywords:** high-pressure centrifugal compressors, modeling of centrifugal compressors, reduced characteristics method, low-temperature separation units.

**For citation:** M.A. Vorontsov, V.Yu. Glazunov, A.S. Grachev, M.S. Mashtalir, S.A. Pospelov, A.V. Chernyshev. Analysis of methods for modeling operating modes of compressor equipment that ensures the operation of field low-temperature separation units. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2023; 50(4):6-16. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-4-6-16

**Введение.** Газоперекачивающие агрегаты (далее – ГПА) и, соответственно, центробежные компрессоры (далее – ЦБК) в их составе являются основными потребителями топливно-энергетических ресурсов, необходимых для устойчивого функционирования систем подготовки газа к транспорту, основанных на принципе низкотемпературной сепарации (далее – НТС), поэтому повышению энергетической эффективности компрессорных станций (далее – КС) посвящено большое количество исследований. Рассматриваются варианты как повышения эффективности оборудования [1 – 4], так и усложнения технологических схем ГПА и систем компримирования: применение газотурбинных установок (далее – ГТУ) парогазового цикла [27] и ГТУ с промежуточным охлаждением в осевом компрессоре [5 – 7], применение распределенного компримирования на

газовых промыслах [8 – 10] и т.д. Наряду с поиском новых технико-технологических решений не теряет актуальность и задача повышения точности математических моделей ЦБК.

Актуальность обусловлена необходимостью повышения точности: решения расчетных задач на этапах проектирования и эксплуатации КС; результатов оценки потенциала повышения эффективности при внедрении новых технико-технологических решений с учетом тенденций развития компрессорного парка ПАО «Газпром».

Рабочие параметры и характеристики ЦБК во многом зависят от объекта его применения: КС магистральных газопроводов (далее – МГ), дожимная компрессорная станция (далее – ДКС), КС подземных хранилищ газа (далее – ПХГ) и т.п. [11].

В настоящее время в состав компрессорного парка ПАО «Газпром» входит широкий спектр ЦБК, различающихся по мощности, по производительности и т.п., и в частности, по отношению давлений (напорности) их можно подразделять на низконапорные и высоконапорные. В данной работе принято, что к высоконапорным относятся ЦБК с отношением давлений выше 1,5...1,7.

На сегодняшний день потребность в высоконапорных многоступенчатых ЦБК возрастает во всех технологических процессах газовой отрасли [11]. Многоступенчатые ЦБК с отношениями давлений до 2,7...5,0 нашли применение на: КС в составе газовых промыслов и ПХГ [12, 13], береговых КС в составе МГ с отношением давлений до 2,7...3,0 [14], заводах сжижения природного газа и на газоперерабатывающих заводах [15], КС специального назначения (выделение гелия, закачка в пласт, компримирования попутного нефтяного газа) [16].

**Постановка задачи.** Для решения ряда технико-технологических задач эксплуатации ГПА и ЦБК (расчета прогнозных режимов работы с определением их эффективности, оценки целесообразности применения модификаций компрессорного оборудования, определения области допустимых режимов работы, оценки технического состояния ЦБК, оценки производительности ГПА и т.п.), обеспечивающих работу установок НТС, осуществляется математическое моделирование режимов работы основного технологического оборудования.

Основой модели ЦБК является математическое описание его газодинамической характеристики (далее – ГДХ) и методика ее пересчета на другие условия работы (температура газа на входе ЦБК, частота вращения ротора ЦБК, состав газа) [17].

ГДХ представляют собой графические или аналитические зависимости, описывающие взаимосвязь основных рабочих параметров ЦБК: объемной производительности на входе в ЦБК ( $Q_{\text{вх}}$ , м<sup>3</sup>/мин), отношения давлений ( $\epsilon$ ), политропной и действительной удельных работ сжатия, политропного КПД ( $\eta_{\text{пол}}$ ), потребляемой («внутренней») мощности и частоты вращения ротора ЦБК ( $n$ , об/мин).

Точность математической модели ГДХ определяет точность моделей ЦБК, ГПА и КС, а также влияет на корректность принимаемых решений (выбор модификаций компрессорных машин, срок их ввода в эксплуатацию, дальнейшую модернизацию) и на рекомендации по оптимизации работы оборудования.

**Методы исследования.** В настоящее время для построения ГДХ широко применяют упрощенные инженерные методы расчета, которые обеспечивают достаточную точность для ЦБК с  $\epsilon < 1,5$  (т.е. низконапорных ЦБК) [17, 18].

При этом с увеличением  $\epsilon$  ЦБК выявлены существенные расхождения между экспериментальными и расчетными данными, например для ЦБК с номинальным отношением давления 2,2 отклонение может достигать 20 % [17, 28].

Соответственно, учитывая увеличение доли высоконапорных ЦБК в парке компрессорного оборудования ПАО «Газпром», включая промысловые ДКС, целесообразно и совершенствование методов математического моделирования режимов работы ЦБК.

На практике уточнение математического описания ГДХ высоконапорных ЦБК в основном решается накоплением статистики для конкретно взятой КС и сравнения результатов фактических режимов с результатами, получаемыми по математической модели [19 – 22]. Для дальнейшего развития подходов математического моделирования актуально накопление фактических данных и

их обсуждение в профессиональной среде.

В данной статье рассматриваются результаты сравнения ГДХ ЦБК единичной мощностью 16,0 МВт с отношением давлений до 2,0, проточная часть которого состоит из четырех ступеней сжатия, полученных с помощью следующих способов моделирования:

- метод приведенных характеристик (далее – МПХ) [19, 23, 24],
- уточненный метод приведенных характеристик (далее – УМПХ) [17],
- метод двухмерной аппроксимации (далее – УМПХ-2D) [17].

При использовании МПХ и УМПХ для получения «поля» ГДХ используют аппроксимацию базовой ГДХ на номинальной частоте вращения в виде зависимостей отношения давлений и политропного КПД от объемного расхода газа на входе в ЦБК  $\varepsilon = \varepsilon(Q_{\text{вх пр}})$ ,  $\eta_{\text{пол}} = \eta_{\text{пол}}(Q_{\text{вх пр}})$ , полученную экспериментально или рассчитанную производителем оборудования. Базовую ГДХ пересчитывают по формулам теории подобия для других частот вращения и/или условий эксплуатации, состава компримируемого газа.

При расчете по МПХ применяются упрощенные формулы пересчета, в которых учитывается только изменение частоты вращения и свойств рабочего тела.

При применении УМПХ в формулах пересчета также учитывается и влияние коэффициента изменения объема газа на входе и выходе ЦБК [12]. Отличием УМПХ-2D является то, что для получения «поля» ГДХ используются три базовые изодромы, определенные для трех частот вращения ротора ЦБК (минимальная, номинальная и средняя). Это необходимо для определения двухпараметрического полинома в виде зависимостей отношения давлений и политропного КПД от объемного расхода газа на входе в ЦБК и частоты вращения ротора  $\varepsilon = \varepsilon(Q_{\text{вх пр}}, n)$ ,  $\eta = \eta(Q_{\text{вх пр}}, n)$ .

В общем случае вид базовой ГДХ может быть получен расчетным [17] и экспериментальным [25, 26] путем. Для данного исследования были получены экспериментальные данные в ходе проведения газодинамических испытаний ЦБК с отношением давлений до 2,0 на действующей ДКС. Для моделирования ГДХ методами МПХ и УМПХ в качестве базовой характеристики использовались изодромы при частоте вращений 4 770 об/мин. При реализации метода УМПХ-2D приняты три изодромы на частотах вращения 4 770 об/мин, 4 100 об/мин и 3 700 об/мин. Расчеты выполнялись с использованием Microsoft Excel (пересчет методами МПХ и УМПХ, построение графиков) и Mathcad (расчет коэффициентов для двухпараметрического полинома в методе УМПХ-2D).

**Обсуждение результатов.** Результаты расчетов представлены на рис. 1 – 8. Результаты сравнения основных параметров ГДХ ЦБК ( $\eta_{\text{поли}}$ ,  $\varepsilon$ ), представлены на рис. 1 и 2.

На рис. 3 – 6 представлено сравнение значений политропного КПД в рабочем диапазоне частоты вращения ротора.

На рис. 7 и 8 представлены максимальные погрешности расчета  $\eta_{\text{поли}}$ ,  $\varepsilon$  для каждого из примененных методов пересчета характеристик. Значения погрешностей были получены при сравнении расчетных характеристик с экспериментальными данными при равных объемных расходах ЦБК в рабочем диапазоне ЦБК.

Из анализа данных рис. 1 – 8 следует, что максимальное отклонение расчетных значений от экспериментальных данных составляет:

- 1) для отношений давлений по МПХ – 5,02%, УМПХ – 1,13%, УМПХ-2D – 0,83%;
- 2) для политропного КПД по МПХ – 10,05%, УМПХ – 3,41%, УМПХ-2D – 1,87%.

Соответственно, погрешность оценки параметров ЦБК с отношением давлений до 2,0 при использовании МПХ значительно выше, чем при использовании УМПХ, а применение УМПХ-2D позволяет добиться наименьших отклонений результатов моделирования от фактических данных. Для МПХ характерно увеличение погрешности по мере удаления рассчитываемой характеристики от базовой (рис. 7 и 8). Также наблюдается увеличение погрешности с увеличением объемного расхода, более детальные исследования данного тренда будут произведены в последующих работах.

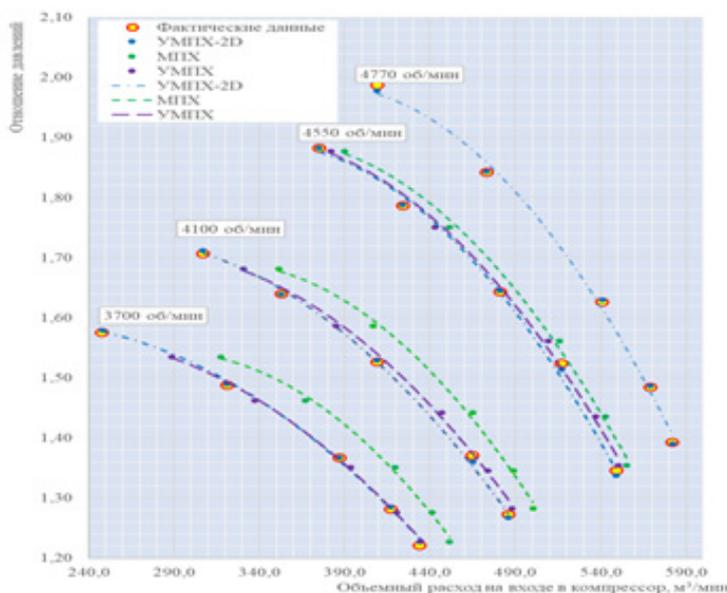


Рис. 1. Сравнение результата пересчета отношений давления по различным методикам и экспериментальных данных

Fig. 1. Comparison of the result of recalculation of pressure ratios using various methods and experimental data

Параметры приведения ГДХ:  $R = 506,7 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ,  $T_{\text{вх}} = 276 \text{ К}$ ,  $P_{\text{вх}} = 2,0 \text{ МПа}$ ; МПХ – метод приведенных характеристик, УМПХ – уточненный метод приведенных характеристик, УМПХ-2D – метод двухмерной аппроксимации

GDC reduction parameters:  $R = 506.7 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ,  $T_{\text{in}} = 276 \text{ K}$ ,  $P_{\text{in}} = 2.0 \text{ MPa}$ ; MPH – method of reduced characteristics, UMPH – refined method of reduced characteristics, UMPH-2D – two-dimensional approximation method

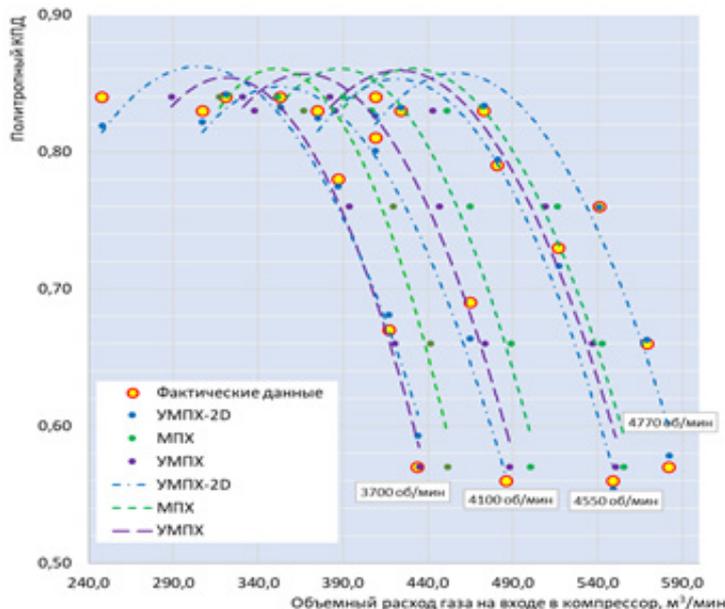


Рис. 2. Сравнение результата пересчета КПД политропного по различным методикам и экспериментальных данных

Fig. 2. Comparison of the result of recalculation of polytropic efficiency using various methods and experimental data

Параметры приведения ГДХ:  $R = 506,7 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ,  $T_{\text{вх}} = 276 \text{ К}$ ,  $P_{\text{вх}} = 2,0 \text{ МПа}$ ; МПХ – метод приведенных характеристик, УМПХ – уточненный метод приведенных характеристик, УМПХ-2D – метод двухмерной аппроксимации

GDC reduction parameters:  $R = 506.7 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ,  $T_{\text{in}} = 276 \text{ K}$ ,  $P_{\text{in}} = 2.0 \text{ MPa}$ ; MPH – method of reduced characteristics, UMPH – refined method of reduced characteristics, UMPH-2D – two-dimensional approximation method

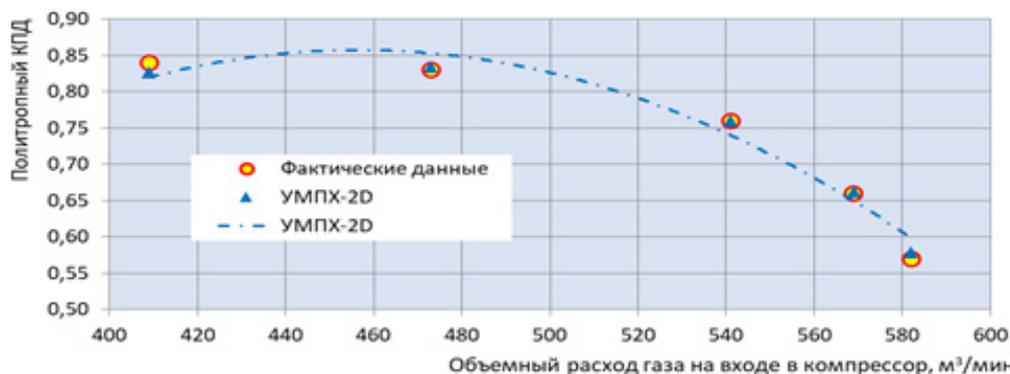


Рис. 3. Политропный КПД при частоте вращения 4 770 об/мин по результатам испытаний и пересчета различными методами

УМПХ-2D – метод двухмерной аппроксимации

Fig. 3. Polytropic efficiency at 4,770 rpm based on test results and recalculation using various methods

UMPH-2D – two-dimensional approximation method

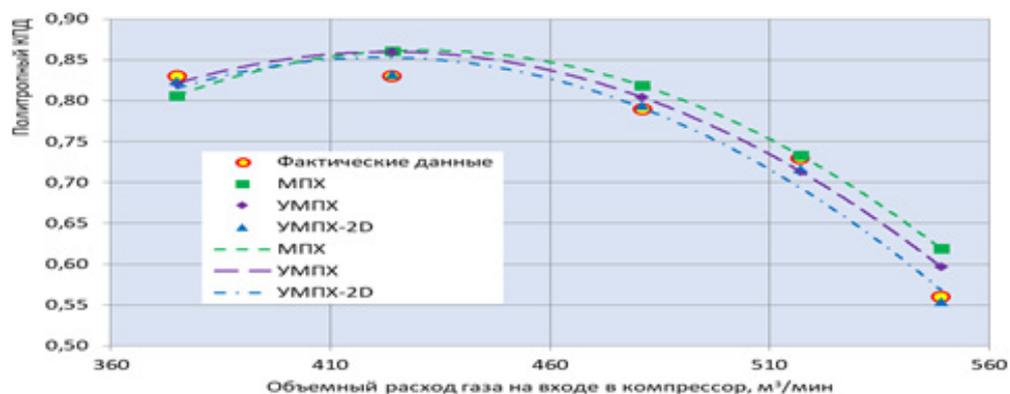


Рис. 4. Политропный КПД при частоте вращения 4 550 об/мин по результатам испытаний и пересчета различными методами

МПХ – метод приведенных характеристик, УМПХ – уточненный метод приведенных характеристик, УМПХ-2D – метод двухмерной аппроксимации

Fig. 4. Polytropic efficiency at a rotation speed of 4,550 rpm based on test results and recalculation using various methods

MPH – method of reduced characteristics, UMPH – refined method of reduced characteristics, UMPH-2D – two-dimensional approximation method

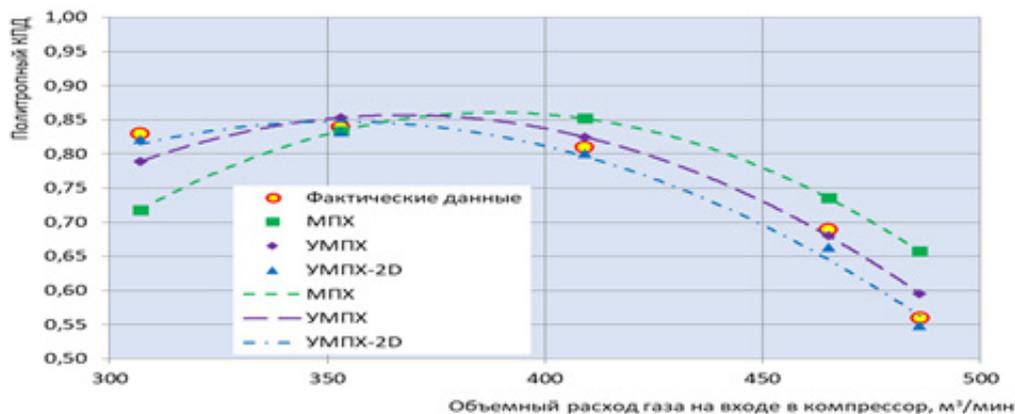
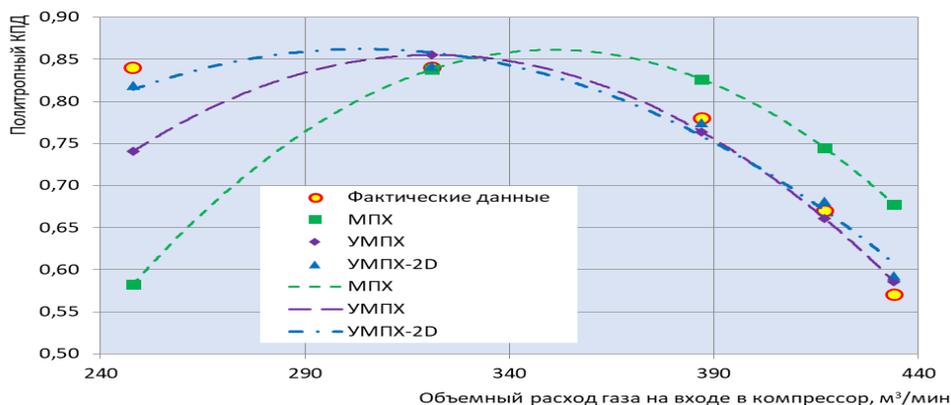


Рис. 5. Политропный КПД при частоте вращения 4 100 об/мин по результатам испытаний и пересчета различными методами

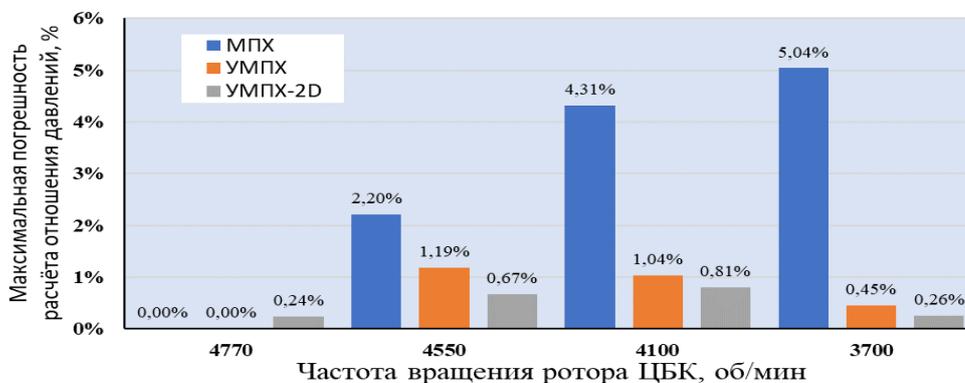
МПХ – метод приведенных характеристик, УМПХ – уточненный метод приведенных характеристик, УМПХ-2D – метод двухмерной аппроксимации

Fig. 5. Polytropic efficiency at a rotation speed of 4,100 rpm based on test results and recalculation using various methods

MPH – method of reduced characteristics, UMPH – refined method of reduced characteristics, UMPH-2D – two-dimensional approximation method

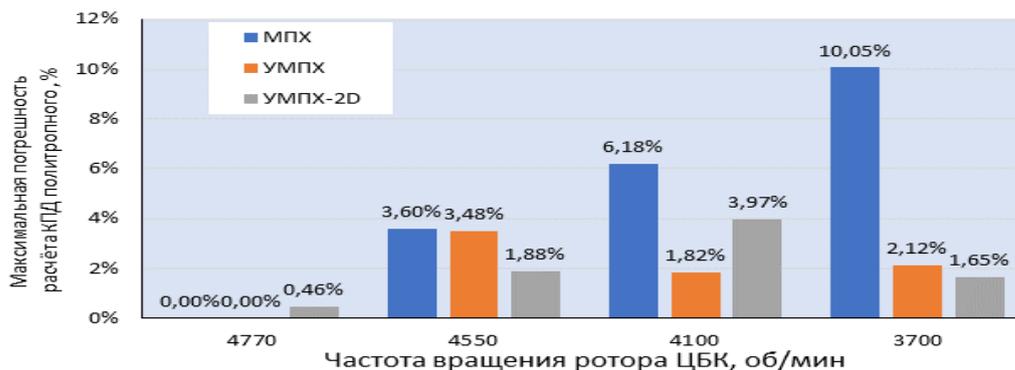


**Рис. 6. Политропный КПД при частоте вращения 3700 об/мин по результатам испытаний и пересчета различными методами МПХ – метод приведенных характеристик, УМПХ – уточненный метод приведенных характеристик, УМПХ-2D – метод двухмерной аппроксимации**  
**Fig. 6. Polytropic efficiency at 3700 rpm based on test results and recalculation using various methods MPH – method of reduced characteristics, UMPH – refined method of reduced characteristics, UMPH-2D – two-dimensional approximation method**



**Рис. 7. Сравнение точности определения отношения давления для рассмотренных способов моделирования ГДХ**

**МПХ – метод приведенных характеристик, УМПХ – уточненный метод приведенных характеристик, УМПХ-2D – метод двухмерной аппроксимации**  
**Fig. 7. Comparison of the accuracy of determining the pressure ratio for the considered methods GDH modeling MPH – method of reduced characteristics, UMPH – refined method of reduced characteristics, UMPH-2D – two-dimensional approximation method**



**Рис. 8. Сравнение точности определения политропного КПД для рассмотренных способов моделирования ГДХ МПХ – метод приведенных характеристик, УМПХ – уточненный метод приведенных характеристик, УМПХ-2D – метод двухмерной аппроксимации**  
**Fig. 8. Comparison of the accuracy of determining polytropic efficiency for the considered methods GDH modeling MPH – method of reduced characteristics, UMPH – refined method of reduced characteristics, UMPH-2D – two-dimensional approximation method**

**Вывод.** Точность моделирования ГДХ ЦБК в составе промышленных ДКС, обеспечивающих работу установок НТС, определяет точность оценки энергопотребления и технического состояния ГПА, а также расчетов перспективных режимов работы газоперекачивающего оборудования, которые выполняются с целью определения возможности реализации плановых производственных показателей (объемов добычи газа, проектных условий установок НТС для обеспечения требуемого уровня температуры сепарации газа и т.п.), потребности и сроков модернизации оборудования или реконструкции станции.

По результату сравнения трех методов математического моделирования ГДХ ЦБК: МПХ, УМПХ и УМПХ-2D – сделаны выводы что при применении метода моделирования УМПХ-2D получены наименьшие погрешности (не более 2,0 %.), что, в свою очередь, свидетельствует о его наибольшей точности среди рассмотренных методов пересчета ГДХ высоконапорных и многоступенчатых компрессоров. Данный метод учитывает изменения коэффициента изменения удельного объема и политропного КПД с изменением условий работы ЦБК. Для использования этого метода потребуется большее количество исходных данных по сравнению с существующими методами – необходимо не менее трех экспериментальных изодром.

Рекомендуется использовать метод пересчета УМПХ-2D для построения расчетных моделей ГДХ при выполнении расчетов прогнозных режимов работы существующих ДКС, обеспечивающих работу установок НТС – это позволит более точно прогнозировать энергетические затраты на работу КС, применять модель в процессе оценки технического состояния во всем рабочем диапазоне ЦБК и оценивать сроки модернизации и реконструкции КС.

#### **Библиографический список:**

1. Hitoshi Shinohara, Hirokazu Kawashima, Masayuki Soneda. Технологии для надежной эксплуатации и обслуживания оборудования // Труды юбилейного 20-го ежегодного международного симпозиума «Компрессоры и компрессорное оборудование» им. К.П. Селезнёва (прежнее название «Потребители-производители компрессоров и компрессорного оборудования»), 2018. – С. 43-49.
2. Никитин В.Т., Доценко В.А., Петухов А.А., Полозов В.Н., Кувытченко Б.Г., В.А. Шигин Установка подачи раствора УПР-ТПГ для промывки центробежного нагнетателя. Журнал «Газовая промышленность». 2017, № 9, С. 32-33.
3. Борисов Ю.А., Калашников Д.А., Чернышев А.В. Профилирование рабочего колеса центробежного компрессора в меридиональной плоскости на основе расчета траекторий движения газа в силовом поле // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2022, № 7 (748), С. 82-89.
4. Борисов Ю.А., Калашников Д.А., Чернышев А.В. Профилирование в радиальной плоскости рабочего колеса центробежного компрессора по закону линейного изменения газодинамических параметров по длине проточной части // Компрессорная техника и пневматика. 2022, № 3, С. 12-18
5. Попова Т.В., Воронцов М.А. Перспективы использования систем охлаждения циклового воздуха газотурбинных установок на базе абсорбционных холодильных машин в составе компрессорных станций // Труды Российского государственного университета нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, № 3. – М.: Изд. центр РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, 2019. – С. 139-150.
6. Попова Т. В. Перспективы и проблемы применения систем охлаждения циклового воздуха ГТУ на базе АБХМ для повышения эффективности эксплуатации компрессорных станций // Нефть и газ - 2019 Тезисы докладов. - М.: РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, 2019. С. 208-209.
7. Игнатова Т.В., Житомирский Б.Л., Воронцов М.А. Использование кожухотрубных теплообменных аппаратов для повышения эффективности газотурбинных установок // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса - 2022. - № 3(129). - С. 45-50.
8. Improved Production in Low-Pressure Gas Wells by Installing Wellsite Compressors. Авторы: Navneet Behl (EOG Resources Inc.) Keith Edward Kiser (Schlumberger) Jeff Ryan (Schlumberger). Доклад на конференции «SPE Gas Technology Symposium», 15-17 мая 2006, г. Калгари, Альберта, Канада.
9. Применение мобильных компрессорных установок на завершающей стадии разработки газовых залежей. Минликаев В.З., Дикамов Д.В., Арно О.Б., Меркулов А.В., Кирсанов С.А., Красовский А.В., Свентский С.Ю., Кононов А.В. / Газовая промышленность № 1, 2015, стр. 15-17. № 1 (717) Год: 2015 Страницы: 15-17.
10. Перспективы применения распределенного компримирования в промышленных системах добычи газа. Воронцов М.А., Ротов А.А., Марущенко И.В., Лаптев Е.М. Вести газовой науки №4 (20) / 2014.
11. Кантюков Р.А. Компрессоры в технологических процессах: газораспределительные, компрессорные станции магистральных газопроводов и автомобильные газонаполнительные компрессорные станции

- / Р.А. Кантюков, Р.Р. Кантюков, М.Б. Хадиев, И.В. Хамидуллин, В.А. Максимов: Казан. нац. исслед. технол. ун-т. Казань, 2014 – 645 с.
12. Барцев И.В., Сеницын Н.С. Компрессорное оборудование для довыработки месторождений природного газа // Труды десятого Международного Симпозиума «Потребителей-производителей компрессоров и компрессорного оборудования — 2004», С.-Пб, СПбГПУ, 2003, С.16-18.
  13. Новые технические решения при создании КС «Шагырлы-Шомышты» в Казахстане / Н.К. Аманжаров, В.С. Королев, В. Кравец, В.П. Парафейник, А.В. Смирнов, В.М. Татарин // Газотурбинные технологии – 2008. – №5 – С. 16-22.
  14. Фик А.С., Бунякин А.В. Моделирование активной газопроводной сети в гидравлическом приближении на примере КС «Береговая» газопровода «Россия-Турция» // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. 2007. №1.
  15. Юн В.К. Центробежный компрессор смешанного хладагента для предприятий сжижения природного газа // Химическая техника. 2017. №9. С. 21–26.
  16. ТехноЧаянда: эффективная технология на уникальном месторождении [Электронный ресурс]. – URL: <https://neftegaz.ru/science/booty/693914-tekhnochayanda-effektivnaya-tekhnologiya-na-unikalnom-mestorozhdenii/> (дата обращения 07.11.2023).
  17. Воронцов М.А., Глазунов В.Ю., Лопатин А.С. Математическое моделирование режимов работы высоконапорного многоступенчатого центробежного компрессора // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 2016. № 1. С. 25-30.
  18. Воронцов М.А., Грачев А.С. О турбомашин и компрессорах на газовом промысле // Магистральные и промысловые трубопроводы: проектирование, строительство, эксплуатация, ремонт: Научно-технический сборник. Том 2. – Москва: Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, 2017. – С. 43-49.
  19. Рис В.Ф. Центробежные компрессорные машины. – М.: Машиностроение, 1964. 336 с.
  20. Расчетный анализ возможных рабочих режимов двухсекционного центробежного компрессора для компрессорной станции попутного нефтяного газа / А.Д. Ваняшов, А.В. Жерелевич, Е.М. Васенко // Техника и технология нефтехимического и нефтегазового производств: Материалы 8-й международной научно-технической конференции. – Омск: ОМГТУ, 2018. – С.149-150.
  21. Глазунов В.Ю., Хафизов А.Р., Давлетов К.М. Корректировка характеристик газоперекачивающих агрегатов (ГПА) дожимных компрессорных станций (ДКС) в процессе эксплуатации // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. 2013. № 6. С. 210-227.
  22. Мониторинг энергоэффективности компримирования газа ДКС на основе фактических характеристик центробежных многоступенчатых компрессоров / Кильдияров С.С., Глазунов В.Ю., Меньшиков С.Н., Полозов В.Н. // Газовая промышленность. 2015. № 2 (718). С. 50-54.
  23. Дэн Г.Н. Проектирование проточной части центробежных компрессоров: Термогазодинамические расчеты. – Л.: Машиностроение, 1980. 232 с.
  24. Методы представления газодинамических характеристик центробежных компрессоров природного газа / Барцев И.В., Сальников С.Ю., Сеницын Н.С. // Сб. Трудов ВНИИГАЗа. Проблемы развития, реконструкции и эксплуатации газотранспортных систем. М., 2003 – С.314–322.
  25. Патент N 2716767 С1 Российская Федерация, МПК G01M 15/00 (2006/01). Испытательный стенд лопаточных компрессоров и способ газодинамических испытаний лопаточных компрессоров : N 2019129641 : заявл. 20.09.2019 : опубликовано 17.03.2020 / Косой А.А., Синкевич М.В., Калашников Д.А., Борисов Ю.А.; заявитель ОИВТ РАН. – 11 с. : ил. — Текст : непосредственный.
  26. Галеркин Ю.Б., Рекстин Ф.С. Методы исследования центробежных компрессорных машин, М.: Машиностроение, 1969. - 304 с.
  27. Зюзьков В.В. Методы повышения энергоэффективности компрессорных станций при реконструкции магистральных газопроводов: Дис. на соискание учёной степени канд. техн. наук с. 05.02.13; Москва, 2011
  28. Воронцов М.А. Энергоэффективность компримирования природного газа на промысле при неравномерности показателей эксплуатации основного газоперекачивающего оборудования: Дис. на соискание учёной степени канд. техн. наук с. 05.02.13; Москва, 2013

#### References

1. Hitoshi Shinohara, Hirokazu Kawashima, Masayuki Soneda. Technologies for reliable operation and maintenance of equipment. Proceedings of the anniversary 20th annual international symposium “Compressors and compressor equipment” named after. K.P. Selezneva (formerly “Consumers-producers of compressors and compressor equipment”) 2018; 43-49 (In Russ)
2. Nikitin V.T., Dotsenko V.A., Petukhov A.A., Polozov V.N., Kuvytchenko B.G., V.A. Shigin Installation of UPR-TPG solution supply for washing the centrifugal blower. *Gas Industry*. 2017; 9: 32-33. (In Russ)
3. Borisov Yu.A., Kalashnikov D.A., Chernyshev A.V. Profiling the impeller of a centrifugal compressor in the meridional plane based on the calculation of gas trajectories in a force field. News of higher educational

- institutions. *Mechanical engineering*. 2022; 7 (748): 82-89. (In Russ)
4. Borisov Yu.A., Kalashnikov D.A., Chernyshev A.V. Profiling in the radial plane of the impeller of a centrifugal compressor according to the law of linear change in gas-dynamic parameters along the length of the flow part. *Compressor technology and pneumatics*. 2022; 3: 12-18. (In Russ)
  5. Popova T.V., Vorontsov M.A. Prospects for the use of cyclic air cooling systems for gas turbine units based on absorption refrigeration machines as part of compressor stations. Proceedings of the Russian State University of Oil and Gas (NRU) named after I.M. Gubkina, No. 3. – M.: Publishing house. Center of the Russian State University of Oil and Gas (NRU) named after I.M. Gubkina, 2019; 139-150. (In Russ)
  6. Popova T.V. Prospects and problems of using cooling systems for cyclic air of gas turbine plants based on ABCM to increase the operating efficiency of compressor stations. Oil and Gas - 2019 Abstracts of reports. - M.: Russian State University of Oil and Gas (NRU) named after I.M. Gubkina, 2019; 208-209. (In Russ)
  7. Ignatova T.V., Zhitomirsky B.L., Vorontsov M.A. The use of shell-and-tube heat exchangers to increase the efficiency of gas turbine units. *Equipment and technologies for the oil and gas complex* 2022; 3(129): 45-50. (In Russ)
  8. Improved Production in Low-Pressure Gas Wells by Installing Wellsite Compressors. By: Navneet Behl (EOG Resources Inc.) Keith Edward Kiser (Schlumberger) Jeff Ryan (Schlumberger). Report at the conference “SPE Gas Technology Symposium”, May 15-17, 2006, Calgary, Alberta, Canada.
  9. The use of mobile compressor units at the final stage of development of gas deposits. Minlikaev V.Z., Dikamov D.V., Arno O.B., Merkulov A.V., Kirsanov S.A., Krasovsky A.V., Svetsky S.Yu., Kononov A.V. *Gas industry* 2015; 1 (717): 15-17: 15-17. (In Russ)
  10. Prospects for the use of distributed compression in field gas production systems. Vorontsov M.A., Ph.D. Rotov A.A., Marushchenko I.V., Laptev E.M. *News of Gas Science* 2014; 4 (20). (In Russ)
  11. Kantyukov R.A. Compressors in technological processes: gas distribution, compressor stations of main gas pipelines and automobile gas-filling compressor stations. R.A. Kantyukov, R.R. Kantyukov, M.B. Khadiev, I.V. Khamidullin, V.A. Maksimov: Kazan. National Research Technol. univ. Kazan, 2014; 645. (In Russ)
  12. Bartsev I.V., Sinitsyn N.S. Compressor equipment for additional development of natural gas fields. Proceedings of the Tenth International Symposium “Consumers-manufacturers of compressors and compressor equipment. 2004”, St. Petersburg, St. Petersburg State Polytechnic University, 2003; 16-18. (In Russ)
  13. New technical solutions when creating the Shagyrlly-Shomyshy compressor station in Kazakhstan / N.K. Amanzharov, V.S. Korolev, V. Kravets, V.P. Parafeinik, A.V. Smirnov, V.M. Tatarinov. *Gas turbine technologies*. 2008; 5 :16-22. (In Russ)
  14. Fik A.S., Bunyakin A.V. Modeling of an active gas pipeline network in a hydraulic approximation using the example of the Beregovaya CS of the Russia-Turkey gas pipeline. *News of universities. North Caucasus region. Series: Technical Sciences*. 2007; 1. (In Russ)
  15. Yun V.K. Centrifugal mixed refrigerant compressor for natural gas liquefaction enterprises. *Chemical engineering*. 2017; 9: 21–26. (In Russ)
  16. TechnoChayanda: effective technology at a unique deposit [Electronic resource]. – URL: <https://neftegaz.ru/science/booty/693914-tekhnochayanda-effektivnaya-tekhnologiya-na-unikalnom-mestorozhdenii/> (date accessed 11/07/2023). (In Russ)
  17. Vorontsov M.A., Glazunov V.Yu., Lopatin A.S. Mathematical modeling of operating modes of a high-pressure multi-stage centrifugal compressor. *Transport and storage of petroleum products and hydrocarbon raw materials*. 2016; 1: 25-30. (In Russ)
  18. Vorontsov M.A., Grachev A.S. About turbomachines and compressors in the gas field. Main and field pipelines: design, construction, operation, repair: *Scientific and technical collection*. Moscow: Russian State University of Oil and Gas (National Research University) named after I.M. Gubkina, 2017; 2: 43-49. (In Russ)
  19. Rees V.F. Centrifugal compressor machines. M.: *Mashinostroenie*, 1964; 336. (In Russ)
  20. Calculation analysis of possible operating modes of a two-section centrifugal compressor for an associated petroleum gas compressor station. A.D. Vanyashov, A.V. Zherelevich, E.M. Vasenko. Equipment and technology of petrochemical and oil and gas production: Materials of the 8th international scientific and technical conference. Omsk: OMTU, 2018; 149-150. (In Russ)
  21. Glazunov V.Yu., Khafizov A.R., Davletov K.M. Adjustment of characteristics of gas pumping units (GPA) of booster compressor stations (BCS) during operation. *Electronic scientific journal Oil and Gas Business*. 2013; 6:210-227. (In Russ)
  22. Monitoring the energy efficiency of gas compression of booster compressor stations based on the actual characteristics of centrifugal multistage compressors. Kildiyarov S.S., Glazunov V.Yu., Menshikov S.N., Polozov V.N. *Gas industry*. 2015; 2 (718): 50-54. (In Russ)
  23. Dan G.N. Design of the flow path of centrifugal compressors: Thermogasdynamic calculations. L.: *Mechanical Engineering*, 1980; 232. (In Russ)
  24. Methods for presenting gas-dynamic characteristics of centrifugal natural gas compressors. Bartsev I.V.,

- Salnikov S.Yu., Sinitsyn N.S. Sat. Proceedings of VNIIGAZ. Problems of development, reconstruction and operation of gas transmission systems. M., 2003; 314–322. (In Russ)
25. Patent N 2716767 C1 Russian Federation, IPC G01M 15/00 (2006/01). Test bench for bladed compressors and method of gas-dynamic testing of bladed compressors: N 2019129641: application. 09/20/2019: published 03/17/2020 / Kosoy A.A., Sinkevich M.V., Kalashnikov D.A., Borisov Yu.A.; applicant JHT RAS. – 11. : ill. Text: direct. (In Russ)
26. Galerkin Yu.B., Rekstin F.S. Methods for studying centrifugal compressor machines, M.: *Mashinostroenie*, 1969; 304. (In Russ)
27. Zyuzkov V.V. Methods for increasing the energy efficiency of compressor stations during the reconstruction of main gas pipelines: Dis. for the academic degree of Candidate of Sciences. tech. sciences p. 02/05/13; Moscow, 2011 (In Russ)
28. Vorontsov M.A. Energy efficiency of natural gas compression in the field with uneven operating indicators of the main gas pumping equipment: Dis. for competition for the academic degree of Candidate of Sciences. tech. sciences. p. 02/05/13; Moscow 2013.(In Russ)

#### **Сведения об авторах:**

Воронцов Михаил Александрович, кандидат технических наук, начальник лаборатории промышленных компрессорных и турбохолодильных систем ООО «Газпром ВНИИГАЗ», доцент кафедры «Вакуумная и компрессорная техника» МГТУ им. Н.Э. Баумана, доцент образовательного центра «Энергоэффективные инженерные системы» ИТМО; [m\\_vorontsov@list.ru](mailto:m_vorontsov@list.ru)

Глазунов Валерий Юрьевич, начальник службы мониторинга технологических процессов добычи, сбора и подготовки газа инженерно-технического центра; [vglazunov@mail.ru](mailto:vglazunov@mail.ru)

Грачев Анатолий Сергеевич, научный сотрудник лаборатории промышленных компрессорных и турбохолодильных систем ООО «Газпром ВНИИГАЗ», аспирант образовательного центра «Энергоэффективные инженерные системы» университета ИТМО; [grachev.anatoliy@yandex.ru](mailto:grachev.anatoliy@yandex.ru)

Машталир Мария Сергеевна, ведущий инженер группы по энергосбережению и энергоэффективности отдела технического развития управления перспективного развития; [mashtalir.m@mail.ru](mailto:mashtalir.m@mail.ru)

Поспелов Сергей Александрович, ведущий инженер испытательной лаборатории службы диагностики инженерно-технического центра; [pospelov\\_s91@mail.ru](mailto:pospelov_s91@mail.ru)

Чернышев Андрей Владимирович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Вакуумная и компрессорная техника»; [chernyshev@bmstu.ru](mailto:chernyshev@bmstu.ru)

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

Mikhail A. Vorontsov, Cand. Sci. (Eng.), Head of the Laboratory of Field Compressor and Turbo-Refrigeration Systems of Gazprom VNIIGAZ LLC, Assoc. Prof. of the Department of Vacuum and Compressor Engineering, MSTU. N.E. Bauman, Assoc. Prof., Educational Center “Energy Efficient Engineering Systems” of ITMO University; [m\\_vorontsov@list.ru](mailto:m_vorontsov@list.ru)

Valery Yu. Glazunov, Head of the monitoring service for technological processes of gas production, collection and preparation of the engineering and technical center; [vglazunov@mail.ru](mailto:vglazunov@mail.ru)

Anatoly S. Grachev, researcher at the laboratory of field compressor and turbo-refrigeration systems of Gazprom VNIIGAZ LLC, graduate student at the educational center “Energy Efficient Engineering Systems” of ITMO University; [grachev.anatoliy@yandex.ru](mailto:grachev.anatoliy@yandex.ru)

Maria S. Mashtalir, Leading engineer of the group for energy saving and energy efficiency of the technical development department of the long-term development department; [mashtalir.m@mail.ru](mailto:mashtalir.m@mail.ru)

Sergey A. Pospelov, Leading engineer of the testing laboratory of the diagnostic service of the engineering and technical center; [pospelov\\_s91@mail.ru](mailto:pospelov_s91@mail.ru)

Andrey V. Chernyshev, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department of Vacuum and Compressor Engineering; [chernyshev@bmstu.ru](mailto:chernyshev@bmstu.ru)

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

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

**Поступила в редакцию/Received 19.09.2023.**

**Одобрена после рецензирования/ Revided 01.11.2023.**

**Принята в печать/Accepted for publication 01.11.2023.**

ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА  
ENERGY AND ELECTRICAL ENGINEERING

УДК 621.565.83

DOI: 10.21822/2073-6185-2023-50-4-17-25



Оригинальная статья /Original article

**Расчет теплоутилизатора с использованием тепловых труб  
в системе утилизации тепла вытяжного воздуха**

**А.С. Зайцев, М.В. Шамаров, Р.А. Жлобо, Е.О. Ивченко**

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

**Резюме. Цель.** Цель работы заключается в разработке практических рекомендаций для конструирования и изготовления теплоутилизатора с использованием тепловых труб, который мог бы найти массовое применение в системах отопления, вентиляции и кондиционирования на объектах различного назначения. **Метод.** Исследование основано на методах термодинамического анализа, натурного и вычислительного моделирования процессов и объектов холодильной и криогенной техники, систем кондиционирования и жизнеобеспечения. **Результат.** Внедрение исследованных в работе практических рекомендаций по применению и конструктивному исполнению теплоутилизаторов с использованием тепловых труб в системах вентиляции, отопления и кондиционирования воздуха позволит обеспечить значительную экономию энергии, затрачиваемой на обогрев и/или охлаждение воздуха, подаваемого в обслуживаемое системой ОВИК помещение. Для снижения теплопотерь в здании рационально сохранять воздушный баланс и компенсировать вытяжной воздух организованным притоком наружного воздуха, на подогрев которого утилизировать теплоту удаляемого вытяжного воздуха. **Вывод.** По сравнению с теплоутилизатором на основе гликолиевого рекуператора, регенератор с использованием тепловых труб менее энергозатратен, практически не требует обслуживания, а также более энергоэффективен за счёт отсутствия в конструкции требующего затрат электроэнергии насосного устройства. При этом способность к полному разделению приточного и вытяжного потоков вентиляции у регенератора на тепловых трубах сохраняется, что крайне востребовано в медицинских учреждениях из-за необходимости соответствия строгим санитарным нормам.

**Ключевые слова:** теплоутилизатор, тепловая труба, вентиляция, расчёт, энергоэффективность, кондиционирование, отопление

**Для цитирования:** А.С. Зайцев, М.В. Шамаров, Р.А. Жлобо, Е.О. Ивченко. Расчет теплоутилизатора с использованием тепловых труб в системе утилизации тепла вытяжного воздуха. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023; 50(4):17-25. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-4-17-25

**Calculation of a heat exchanger using heat pipes in the exhaust air heat recovery system**

**A.S. Zaitsev, M.V. Shamarov, R.A. Zhlobo, E.O. Ivchenko**

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

**Abstract. Objective.** The purpose of the work is to develop practical recommendations for the design and manufacture of a heat exchanger using heat pipes, which could find widespread use in heating, ventilation and air conditioning systems at facilities for various purposes. **Method.** The research is based on methods of thermodynamic analysis, full-scale and computational modeling of processes and objects of refrigeration and cryogenic technology, air conditioning and life support systems. **Result.** The implementation of the practical recommendations studied in the work on the use and design of heat exchangers using heat pipes in ventilation, heating and air con-

ditioning systems will provide significant savings in energy spent on heating and/or cooling the air supplied to the room served by the HVAC system. To reduce heat loss in a building, it is rational to maintain air balance and compensate for the exhaust air with an organized influx of outside air, to heat which the heat of the removed exhaust air is utilized. **Conclusion.** Compared to a heat exchanger based on a glycol recuperator, a regenerator using heat pipes is less energy-intensive, requires virtually no maintenance, and is also more energy efficient due to the absence of a pumping device that requires electricity in the design. At the same time, the ability to completely separate the supply and exhaust ventilation flows of the regenerator on heat pipes is preserved, which is extremely in demand in medical institutions, due to the need to comply with strict sanitary standards.

**Keywords:** heat exchanger, heat pipe, ventilation, calculation, energy efficiency, air conditioning, heating

**For citation:** A.S. Zaitsev, M.V. Shamarov, R.A. Zhlobo, E.O. Ivchenko. Calculation of a heat exchanger using heat pipes in the Exhaust air heat Recovery System. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2023; 50(4):17-25. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-4-17-25

**Введение.** В связи с нарастающим дефицитом источников энергии, которая всё более необходима мировой экономике практически во всех её сферах и отраслях, а также с усилением тренда бережного отношения к окружающей среде, всё большую эффективность приобретают различные методы и технологии, целью которых является наиболее рациональное использование энергии, в том числе и тепловой. Одним из способов более бережливого использования энергии в сферах промышленности, отопления, вентиляции и кондиционирования и т.д. является утилизация тепла.

Теплоутилизаторы подобной конструкции способны конкурировать с аппаратами для утилизации тепла иных, более распространённых конструкций, за счёт отсутствия необходимости частого сервисного обслуживания, относительной простоты и надёжности конструкции в целом, а также за счёт отсутствия капиталоемких и потенциально проблемных элементов в конструктиве теплоутилизатора, таких как частотный преобразователь для вращения (необходимая составляющая роторного регенератора), или насосная группа и система трубопроводов (по сравнению с гликолиевым рекуператором). В то же время конкурентное преимущество в виде возможности полного разделения потоков воздуха в приточно-вытяжной системе сохраняется, что делает теплоутилизатор с использованием тепловых труб одним из возможных решений для применения в медицинских учреждениях, либо цехах технологических производств со строгими требованиями к воздухообмену.

**Постановка задачи.** Источником теплоты в рассматриваемых системах утилизации является вытяжной выбросной воздух, имеющий в холодный период года в обычных системах вентиляции гражданских и промышленных зданий температуру не выше 20...28 °С. При извлечении утилизируемой теплоты рационально понижать энтальпию выбросного воздуха до параметров, при которых мала вероятность замерзания выпадающей влаги из охлаждаемого вытяжного воздуха в теплоизвлекающем теплообменнике.

Нагрев приточного воздуха в холодный и переходный периоды года в теплоотдающем теплообменнике происходит при постоянном влагосодержании, а утилизация теплоты вытяжного воздуха, как правило, - при конденсации из него влаги.

**Методы исследования.** Рассмотрим теплоутилизатор состоящий из теплоизвлекающего и теплоотдающего теплообменников и режимов их функционирования в системе утилизации с промежуточным теплоносителем – антифризом:

Исходными заданными являются:

- расход удаляемого вытяжного воздуха  $L_y = 9000 \text{ м}^3/\text{ч}$ ;
- температура удаляемого воздуха  $t_{y1} = 24$ ;
- энтальпия удаляемого воздуха  $i_{y1} = 40 \text{ кДж/кг}$ ;
- расход проточного наружного воздуха  $L_{п.н} = 12000 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

Расчетная температура наружного воздуха в холодный период года для г. Краснодар по параметрам Б, согласно СП 131.1330.2020 :  $t_{н1} = -15^{\circ}\text{C}$ ; энтальпия  $i_{н1} = -13,3$  кДж/кг. В рабочей зоне помещения поддерживается температура  $22^{\circ}\text{C}$  и относительная влажность 30%. В помещении имеют место тепло- и влагоизбытки, удаление которых в холодный период года требует подачи приточного воздуха с температурой  $10^{\circ}\text{C}$  и энтальпией 11 кДж/кг. На I-d-диаграмму наносятся (рис. 1):

- точка В, отвечающая параметрам воздуха в зоне нахождения людей;
- точка  $У_1$  отвечающая параметрам удаляемого из верхней зоны актового зала вытяжного воздуха;
- точка  $Н_1$ , характеризующая параметры воздуха в расчетных условиях холодного периода для г. Краснодар;
- точка  $П_н$ , характеризующая параметры приточного наружного воздуха, обеспечивающие удаление расчетных тепло- и влагоизбытков из помещения.

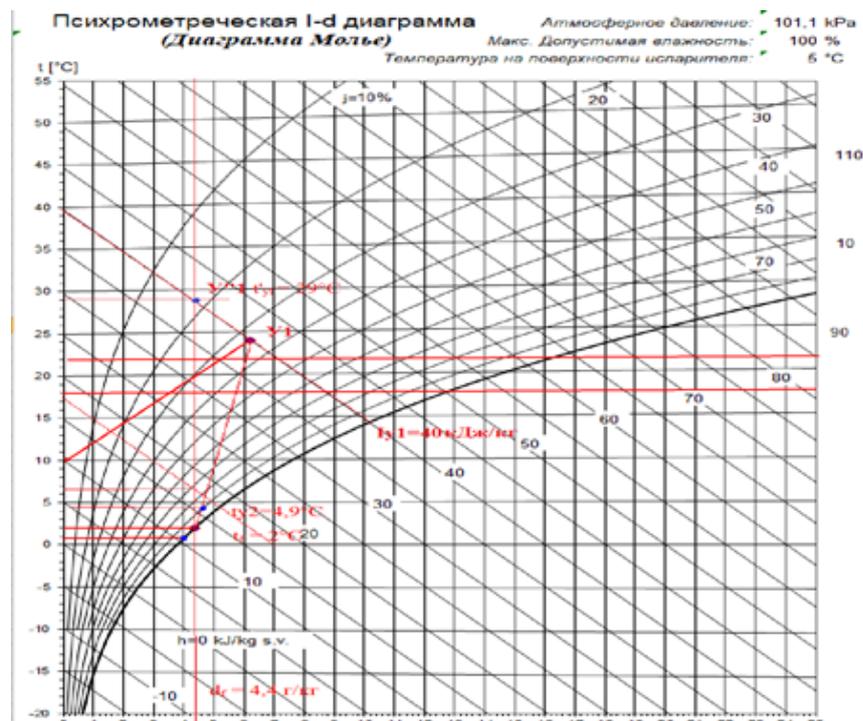


Рис. 1. I-d диаграмма влажного воздуха

Fig. 1. I-d diagram of humid air

На I-d-диаграмме наносится точка  $f$ , отвечающая средней рекомендуемой температуре поверхности теплоизвлекающего теплообменника  $t_{\phi} = 2^{\circ}\text{C}$ . Из построения следует, что температура точки росы удаляемого воздуха равна  $7,1^{\circ}\text{C}$  и больше средней температуры поверхности теплоизвлекающего теплообменника  $2^{\circ}\text{C}$ . Это свидетельствует о том, что при извлечении теплоты из вытяжного воздуха будет иметь место процесс его охлаждения с конденсацией влаги.

Определение достигаемых параметров вытяжного воздуха производится построением на I-d-диаграмме, где прямой линией соединяются точки  $У_1$  и  $\phi$ . В месте пересечения этой прямой линии с кривой  $\phi_{y2} = 88\%$  находится точка  $У_2$  с температурой  $4,9^{\circ}\text{C}$  и энтальпией  $16,8$  кДж/кг. На пересечении прямой линии  $d_{\phi} = 4,4$  г/кг с энтальпиями  $i_{y1}$  и  $i_{y2}$  находим точки  $У'_1$  (температура  $t'_{y1} = 29^{\circ}\text{C}$ ) и  $У'_2$  (температура  $t'_{y2} = 6,5^{\circ}\text{C}$ ), отвечающие режиму условно «сухого» охлаждения вытяжного воздуха при одинаковом перепаде энтальпий  $i_{y1} - i_{y2}$ . Вычисляем общее количество отводимого в теплоизвлекающем теплообменнике от вытяжного воздуха тепла:  $Q_y = 9000 * 1,2 * (40 - 16,8) = 250560$  кДж/ч.

Определяем температуру нагретого в теплоотдающем теплообменнике приточного воздуха:

$$t_{н2} = \frac{250560}{12000 * 1,2 * 1} - 15 = 2,4^{\circ}\text{C}$$

Полученная температура  $t_{н2} = 2,4$  °С меньше требуемой температуры приточного наружного воздуха  $t_{пн} = 10$ °С. Поэтому необходимо в приточной системе предусмотреть концевой воздухонагреватель, питаемый горячей водой либо электроэнергией.

По рекомендациям, приведенным выше, перепад температур антифриза принимаем  $\Delta t_{аф} = 7$ °С. В качестве антифриза используем 35%-ный водный раствор этиленгликоля с температурой замерзания - 20°С, удельной теплоемкостью  $C_{аф} = 3,65$  кДж/(кг \* °С), массовой плотностью 1045 кг/м<sup>3</sup>.

По формуле вычисляем требуемый расход теплоносителя - антифриза:

$$G_{аф} = \frac{250560}{7 * 3,65} = 9806 \text{ кг/ч}$$

Находим среднюю температуру антифриза:

$$t_{аф.ср} = 2 - 1 = 1^\circ\text{C}.$$

Определяем температуру подогретого теплоносителя - антифриза после теплоизвлекающего теплообменника:

$$t_{аф1} = 1 + \frac{7}{2} = 4,5^\circ\text{C}$$

Вычисляем температуру охлажденного теплоносителя - антифриза после теплоотдающего теплообменника:

$$t_{аф2} = 1 - \frac{7}{2} = -2,5^\circ\text{C}$$

Определяем требуемые показатели теплотехнической эффективности для теплоотдающего теплообменника:

$$\theta_{т.п.н} = \frac{2,4 + 15}{4,5 + 15} = 0,892$$

Находим требуемый показатель теплотехнической эффективности в условно «сухом» режиме охлаждения для теплоизвлекающего теплообменника:

$$\theta_{т.у} = \frac{29 - 6,5}{29 + 2,5} = 0,714$$

Вычисляем показатели отношения теплоемкости потоков:

- для теплоотдающего теплообменника:

$$W_{пн} = \frac{12000 * 1,21 * 1}{9806 * 3,65} = 0,405$$

- для теплоизвлекающего теплообменника:

$$W_y = \frac{9000 * 1,2 * 1}{9806 * 3,65} = 0,301$$

По графику находим требуемые численные значения критерия  $F_0$ :

- для теплоотдающего теплообменника  $F_{0пн} = 3$ ;

- для теплоизвлекающего теплообменника  $F_{0у} = 1,5$ .

Вычисляем требуемую величину произведения  $k_F$ :

- для теплоотдающего теплообменника:

$$kF_{пн} = \frac{3 * 12000 * 1,21 * 1000}{3600} = 12100 \frac{\text{Вт}}{^\circ\text{C}};$$

- для теплоизвлекающего теплообменника:

$$kF_y = \frac{1,5 * 9000 * 1,2 * 1000}{3600} = 4500 \frac{\text{Вт}}{^\circ\text{C}};$$

Задаемся массовой скоростью воздуха 2,5 кг/(м<sup>2</sup>•с) и находим требуемое фасадное сечение:

- для теплоотдающего теплообменника:  $f_{пн} = \frac{12000 * 1,21}{2,5 * 3600} = 1,613 \text{ м}^2$ ;

- для теплоизвлекающего теплообменника:  $f_{фy} = \frac{9000 * 1,2}{2,5 * 3600} = 1,2 \text{ м}^2$ .

Требуемые фасадные сечения обеспечиваются применением двух калориферов  $f_{\phi} = 0,8 * 2 = 1,6 \text{ м}^2$ . Действительная массовая скорость воздуха в фасадном сечении вычисляется:

$$\text{для теплоотдающего теплообменника: } (V\rho)_{\text{пн}} = \frac{12000 * 1,21}{3600 * 1,6} = 2,52 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с});$$

- по выражению (15) для теплоизвлекающего теплообменника:

$$(V\rho)_y = \frac{9000 * 1,2}{3600 * 1,6} = 1,875 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}).$$

Оцениваем возможность применения калориферов, вычисляя коэффициент теплопередачи в трехрядных теплообменниках при скорости жидкости в трубках 1 м/с:

- для теплоотдающего теплообменника:

$$K = 29 * V\rho^{0,455} * w^{0,14} = 29 * (2,52)^{0,455} * 1^{0,14} = 44,16 \text{ Вт}/(\text{м}^2 * \text{°C});$$

- для теплоизвлекающего теплообменника:

$$K = 29 * V\rho^{0,455} * w^{0,14} = 29 * (1,875)^{0,455} * 1^{0,14} = 38,6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 * \text{°C}).$$

Вычисляем требуемые поверхности:

$$\text{для теплоотдающего теплообменника: } F = \frac{kF}{k} = \frac{12100}{44,16} = 274 \text{ м}^2;$$

$$\text{для теплоизвлекающего теплообменника: } F = \frac{kF}{k} = \frac{4500}{38,6} = 117 \text{ м}^2.$$

Применение 2 шт. калориферов обеспечивает развитие наружной поверхности  $140 \times 2 = 280 \text{ м}^2$ . Сечение трубок в ходу для прохода жидкости в каждом калорифере  $0,002 \text{ м}^2$ . Принимаем к установке по 1 калорифера в ряду и по 1 последовательно по воздуху. Скорость в трубках будет:

$$W_{\text{аф}} = \frac{G_{\text{аф}}}{\rho * 3600 * 0,002 * 1} = \frac{9806}{1045 * 3600 * 0,002 * 1} = 1,303 \text{ м}/\text{с}.$$

Что близко к предварительно принятому оптимальному значению скорости, уточнений величин коэффициентов теплопередачи не требуется.

Вычисляем аэродинамическое сопротивление теплообменников:

- по наружному воздуху:

$$\Delta P_{\text{пн}} = 7,4 * (V\rho)^{1,71} * Z = 7,4 * (2,52)^{1,71} * 1 = 35,94 \text{ Па};$$

- по удаляемому воздуху:

$$\Delta P_y = 7,4 * (V\rho)^{1,71} * Z = 7,4 * (1,875)^{1,71} * 1 = 21,68 \text{ Па}.$$

Как видно из построения, в теплоизвлекающем теплообменнике будет иметь место конденсация влаги, что увеличит его аэродинамическое сопротивление. Для учета этого применим опытный коэффициент 1,35. Тогда действительное аэродинамическое сопротивление в теплоизвлекающем теплообменнике составит:

$$\Delta P'_y = \Delta P_y * 1,35 = 21,68 * 1,35 = 29,3 \text{ Па}$$

Из построения на диаграмме следует, что в обслуживаемом помещении в зону нахождения людей приточный наружный воздух должен поступать с температурой  $t_{\text{пн}} = 10 \text{ °C}$ . По условиям теплового комфорта температура поступающего в зону нахождения людей приточного воздуха не должна более чем на  $4 \text{ °C}$  быть ниже комфортного значения температуры воздуха в зоне обитания, которая для холодного периода года равна  $22 \text{ °C}$ . Тогда по условиям теплового комфорта температура приточного воздуха может быть  $t_{\text{пн}} = 22 - 4 = 18 \text{ °C}$ .

Для обеспечения теплового комфорта при воздухораспределении в системе приточной вентиляции используется эжекционный распределитель, в котором благодаря смешению холодного приточного воздуха (точка ПН) и эжектируемого внутреннего воздуха (точка В) обеспечивается повышение температура воздуха до  $18 \text{ °C}$  (точка П).

Применение эжекционного распределителя позволяет экономить энергию на подогреве принятого воздуха. Оценку энергетической эффективности систем утилизации теплоты вытяжного воздуха рационально проводить путем вычисления показателей теплопреобразования и их сравнения для различных технических решений систем:

$$\eta_{\text{ут}} = \frac{Q_y}{\Sigma N_{\text{ут}}} \text{ кВт}/\text{кВт}.$$

Общие затраты электроэнергии  $\Sigma N_{\text{ут}}$  кВт, связанные с функционированием системы утилизации, вычисляются в соответствии с принятыми техническими решениями системы по формулам:

- затраты электроэнергии на преодоление аэродинамического сопротивления теплоизвлекающего теплообменника  $\Delta N_{\text{вн.у}} = \frac{L_{\text{у}} \cdot \Delta P_{\text{у}}}{3600 \cdot 1000 \cdot \eta_{\text{вн.у}}}$ ;

- затраты электроэнергии на преодоление аэродинамического сопротивления теплоотдающего теплообменника  $\Delta N_{\text{вн.н}} = \frac{L_{\text{п.н}} \cdot \Delta P_{\text{п.н}}}{3600 \cdot 1000 \cdot \eta_{\text{вн.п.н}}}$ ;

- затраты электроэнергии на функционирование насоса циркуляции теплоносителя – антифриза  $\Delta N_{\text{нас}} = \frac{G_{\text{а.ф}} \cdot \Delta P_{\text{нас}}}{\rho_{\text{аф}} \cdot 3600 \cdot \eta_{\text{нас}}}$ ;

где  $\eta_{\text{вн.у}}$ ;  $\eta_{\text{вн.п.н}}$ ;  $\eta_{\text{нас}}$  - КПД соответственно вытяжного и приточного вентиляторов, насоса;  $P_{\text{нас}}$  - давление насоса на преодоление гидравлических сопротивлений в системе, кПа.

Вычислим затраты электроэнергии на функционирование системы утилизации теплоты вытяжного воздуха, конструктивные элементы и показатели работы которой определены по расчетам в предыдущем разделе. Определяем затраты электроэнергии на преодоление аэродинамического сопротивления теплоизвлекающего теплообменника:

$$\Delta N_{\text{вн.у}} = \frac{9000 \cdot 29,3}{3600 \cdot 1000 \cdot 0,7} = 0,104 \text{ кВт.}$$

Вычисляем затраты на преодоление аэродинамического сопротивления теплоотдающего теплообменника:

$$\Delta N_{\text{вн.н}} = \frac{12000 \cdot 35,94}{3600 \cdot 1000 \cdot 0,7} = 0,171.$$

Расчёт затрат на преодоление гидравлического сопротивления в 120 кПа при перемещении насосом антифриза:

$$\Delta N_{\text{нас}} = \frac{9806 \cdot 54,03}{1045 \cdot 3600 \cdot 0,6} = 0,235.$$

Суммарные затраты электроэнергии:

$$\Sigma N_{\text{ут}} = 0,104 + 0,171 + 0,235 = 0,51 \text{ кВт.}$$

По формуле вычисляем показатель энергетической эффективности применения системы утилизации теплоты вытяжного воздуха при расчетном извлечении теплоты:  $Q_{\text{у}} = 250560 \text{ кДж/ч} = 69,6 \text{ кВт}$ :

$$\eta_{\text{ут}} = \frac{69,6}{0,51} = 136,47.$$

**Обсуждение результатов.** Проведенный подбор схемы обвязки трубопроводами теплоизвлекающего и теплоотдающего теплообменников на базе калориферов при их применении в системах утилизации с промежуточным теплоносителем - антифризом выявил следующее:

- сечение ходов калориферов для прохода жидкости мало и не отвечает рациональным условиям обеспечения оптимальных скоростей жидкости при высоких расходах антифриза;
- необходимо рационально использовать калориферы в системах утилизации с промежуточным теплоносителем при их изготовлении двухходовыми по жидкости, что позволит в некоторых моделях калориферов увеличить площадь сечения для прохода жидкости в 2-3 раза;
- использование в системах утилизации двухходовых по жидкости калориферов позволит выполнить обвязку трубопроводов для обеспечения противоточной схемы, а также сократит гидравлическое сопротивление калориферов;
- при реализации противоточной схемы для улучшения отвода конденсата в теплоизвлекающем теплообменнике холодный теплоноситель с температурой  $t_{\text{аф2}}$  следует направлять в нижний последний по ходу выбросного воздуха теплообменник, где будет иметь место наиболее интенсивная конденсация влаги.

**Вывод.** Полученная величина показателя энергетической эффективности выше по сравнению с величиной показателя энергетической эффективности при использовании

холодильных машин в режиме теплового насоса, что говорит о высокой энергетической целесообразности применения систем утилизации теплоты вытяжного воздуха с насосной циркуляцией промежуточного теплоносителя - антифриза.

Для выбора рационального конструктивного решения системы утилизации проводится сравнение по энергетическим показателям нескольких возможных конструктивных решений теплоизвлекающего и теплоотдающего теплообменников и режимов их работы.

#### Библиографический список:

1. Зайцев А.С. Центральный кондиционер: состав и принцип работы / А.С. Зайцев, М.В. Шамаров // Современные научно-практические решения XXI века: Материалы международной научно-практической конференции, Воронеж, 21–22 декабря 2016 года / Общая редакция: В.И. Оробинский, В.Г. Козлов. Том Часть II. – Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, 2016. – С. 36-39.
2. 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.
3. Коновалов Н.А. Анализ способа защиты изоляции холодильника от увлажнения / Н.А. Коновалов, А.С. Зайцев, М.В. Шамаров // Механика, оборудование, материалы и технологии: 4 Международная научно-практическая конференция, Краснодар, 25–26 ноября 2021 года. – Краснодар: Общество с ограниченной ответственностью «ПринтТерра», 2021. – С. 510-518.
4. Возможности применения теплонасосных технологий на предприятиях пищевой промышленности / Е.Г. Степанова, Р.А. Жлобо, Б.Ю. Орлов [и др.] // Вестник Керченского государственного морского технологического университета. – 2022. – № 4. – С. 361-380.
5. Энергосберегающие и экологические аспекты применения теплонасосных установок в процессе экстрагирования сахара / Е.Г. Степанова, М.В. Шамаров, Р.А. Жлобо [и др.] // Экологический Вестник Северного Кавказа. – 2022. – Т. 18, № 4. – С. 47-53.
6. Жлобо Р.А. Расчет постоянных коэффициентов уравнения Ван-дер-Ваальса для дихлордифторметана, применяемого при низкотемпературном хранении пищевых продуктов / Р.А. Жлобо, А.С. Зайцев, М.В. Шамаров // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. – 2022. – № 4(388). – С. 105-110.
7. Зайцев А.С. Технология изготовления полволоконной мембраны на основе полимерных волокон для сепарации газов / А.С. Зайцев, М.В. Шамаров // Механика, оборудование, материалы и технологии: Электронный сборник научных статей по материалам международной научно-практической конференции, Краснодар, 29–30 ноября 2022 года. – Краснодар: ООО «ПринтТерра», 2022. – С. 585-590.
8. Зайцев А.С. Системы противодействия увлажнению изоляции холодильника / А.С. Зайцев, М.В. Шамаров, Ю.С. Беззаботов // Механика, оборудование, материалы и технологии: Электронный сборник научных статей по материалам международной научно-практической конференции, Краснодар, 29–30 ноября 2022 года. – Краснодар: ООО «ПринтТерра», 2022. – С. 558-565.
9. Расчёт испарителя для низкотемпературной сушки свекловичного жома работающем на фреоне r134a / Р.А. Жлобо, М.В. Шамаров, Д.Ю. Цуканов [и др.] // Механика, оборудование, материалы и технологии: Электронный сборник научных статей по материалам международной научно-практической конференции, Краснодар, 29–30 ноября 2022 года. – Краснодар: ООО «ПринтТерра», 2022. – С. 524-535.
10. Перспективные направления переработки и утилизации отходов свеклосахарного производства / Е.Г. Степанова, М.В. Шамаров, Р.А. Жлобо [и др.] // Актуальные проблемы экологии: сборник научных статей, Гродно, 05–06 октября 2022 года / Гродненский государственный университет имени Янки Купалы и др. – Гродно: Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, 2022. – С. 151-153.
11. Патент № 2784632 С1 Российская Федерация, МПК F26B 19/00, F26B 21/04. Сушильная установка: № 2022123153: заявл. 30.08.2022: опубл. 29.11.2022 / Р.А. Жлобо, М.В. Шамаров, Е.Г. Степанова [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный технологический университет».
12. Беззаботов Ю.С. Математическое моделирование процесса низкотемпературной сушки в установке с регенеративным циклом / Ю.С. Беззаботов, Е.О. Ивченко // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. – 2019. – № 4(370). – С. 79-82. – DOI 10.26297/0579-3009.2019.4.20.
13. Беззаботов Ю.С. Оценка эффективности низкотемпературной сушки на основе энергетического анализа процессов в элементах сушильной установки / Ю.С. Беззаботов, Е.О. Ивченко // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. – 2019. – № 5-6(371-372). – С. 84-86. – DOI

10.26297/0579-3009.2019.5-6.21.

14. Беззаботов, Ю.С. Оценка эффективности низкотемпературной сушки на основе энергетического анализа процессов в элементах сушильной установки / Ю.С. Беззаботов, Е.О. Ивченко // Электронный сетевой политематический журнал «Научные труды КубГТУ». – 2020. – № 1. – С. 37-45.
15. Жлобо, Р.А. Зависимость коэффициента сжимаемости этана от давления при различных температурах / Р.А. Жлобо, А.С. Зайцев // Перспективные материалы и высокоэффективные процессы обработки: сборник материалов Всероссийской молодежной конференции, Саратов, 18–19 мая 2022 года. – Саратов: Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., 2022. – С. 73-75.
16. Степанова, Е.Г. Исследование процесса охлаждения рыбы с применением бинарного льда / Е.Г. Степанова, Р.А. Жлобо, И.Е. Трофименко // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. – 2022. – № 3. – С. 262-266. – DOI 10.24412/2311-6447-2022-3-262-266.
17. Жлобо, Р.А. Моделирование процесса холодильного воздействия на пищевые продукты / Р.А. Жлобо, М.В. Шамаров, В.И. Алешин // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023. – Т. 50, № 1. – С. 24-32. DOI 10.21822/2073-6185-2023-50-1-24-32.
18. Моделирование процесса размораживания мороженого для оптимизации его перевозки / Р.А. Жлобо, М.В. Шамаров, Е.Г. Степанова, Б.Ю. Орлов // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. – 2023. – № 1. – С. 183-187. – DOI 10.24412/2311-6447-2023-1-183-187.
19. Патент № 2798054 С1 Российская Федерация, МПК С13В 10/00, F25В 30/00. Свеклоперерабатывающее отделение с колонным диффузионным аппаратом: № 2023104050: заявл. 22.02.2023; опубл. 14.06.2023 / М. В. Шамаров, Е. Г. Степанова, М. А. Печерица [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный технологический университет».
20. Степанова, Е.Г. Приборы и техника низкотемпературных систем / Е.Г. Степанова, Б.Ю. Орлов, Р.А. Жлобо. – Краснодар: Кубанский государственный технологический университет, 2021. – 292 с. – ISBN 978-5-8333-1086-1.
21. Степанова, Е. Г. Тепловые насосы / Е. Г. Степанова, Р. А. Жлобо. – Краснодар: Кубанский государственный технологический университет, 2023. – 92 с.

#### References

1. Zaitsev A.S., Shamarov M.V. Central air conditioner: composition and principle of operation. Modern scientific and practical solutions of the XXI century: Proceedings of the international scientific and practical conference, Voronezh, December 21–22, 2016. General editorial board: V.I. Orobinsky, V.G. Kozlov. Volume Part II. Voronezh: Voronezh State Agrarian University. Emperor Peter I, 2016; 36-39. (In Russ)
2. Shamarov M.V, Zaitsev A.S. Analysis of heat transfer during freezing and melting on the example of a cold accumulator from heat pipes. 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)
3. Konovalov N.A. Analysis of the way to protect the insulation of the refrigerator from moisture / N.A. Konovalov, A.S. Zaitsev, M.V. Shamarov. Mechanics, equipment, materials and technologies: 4th International scientific and practical conference, Krasnodar, November 25–26, 2021. - Krasnodar: PrintTerra Limited Liability Company, 2021; 510-518. (In Russ)
4. Possibilities of using heat pump technologies at food industry enterprise/ E.G. Stepanova, R.A. Zhlobo, B.Yu. Orlov[et al.] *Bulletin of the Kerch State Marine Technological University*. 2022; 4:361-380. (In Russ)
5. Energy-saving and environmental aspects of the use of heat pump installations in the process of sugar extraction. E.G. Stepanova, M.V. Shamarov, R.A. Zhlobo [and others]. *Ecological Bulletin of the North Caucasus*. 2022;18(4):47-53. (In Russ)
6. Zhlobo R.A. Calculation of constant coefficients of the van der Waals equation for dichlorodifluoromethane used in low-temperature food storage. R.A. Zhlobo, A.S. Zaitsev, M.V. Shamarov. *News of higher educational institutions. Food technology*. 2022; 4 (388): 105-110. (In Russ)
7. Zaitsev A.S., M.V. Shamarov. Manufacturing technology of hollow fiber membrane membranes based on polymeric fibers for gas separation. *Mechanics, equipment, materials and technologies: Electronic collection of scientific articles based on the materials of the international scientific and practical conference*, Krasnodar, November 29–30, 2022. - Krasnodar: PrintTerra LLC, 2022; 585-590. (In Russ)
8. Zaitsev A.S. Systems for counteracting dampening of refrigerator insulation / A.S. Zaitsev, M.V. Shamarov, Yu.S. Bezzabotov. Mechanics, equipment, materials and technologies: Electronic collection of scientific articles based on the materials of the international scientific and practical conference, Krasnodar, November 29–30, 2022. - Krasnodar: PrintTerra LLC, 2022; 558-565. (In Russ)
9. Calculation of the evaporator for low-temperature drying of beet pulp operating on freon r134a / R.A. Zhlobo, M.V. Shamarov, D.Yu. Tsukanov [et al.] *Mechanics, equipment, materials and technologies: Electronic collection of scientific articles based on the materials of the international scientific and practical conference*,

- Krasnodar, November 29–30, 2022. - Krasnodar: PrintTerra LLC, 2022; 524-535. (In Russ)
10. Perspective directions of processing and utilization of beet sugar production / E.G. Stepanova, M.V. Shamarov, R.A. Zhlobo [and others] Actual problems of ecology: a collection of scientific articles, Grodno, October 05–06, 2022 / Yanka Kupala State University of Grodno and others - Grodno: Yanka Kupala State University of Grodno, 2022; 151 -153. (In Russ)
  11. Patent No. 2784632 C1 Russian Federation, IPC F26B 19/00, F26B 21/04. Dryer: No. 2022123153: Appl. 08/30/2022: publ. 11/29/2022 / R.A. Zhlobo, M.V. Shamarov, E.G. Stepanova [and others]; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Kuban State Technological University”.
  12. Bezzabotov Yu.S. Mathematical modeling of the process of low-temperature drying in an installation with a regenerative cycle / Yu.S. Bezzabotov, E.O. Ivchenko. *News of higher educational institutions. Food technology*. 2019; 4 (370): 79-82. – DOI 10.26297/0579-3009.2019.4.20. (In Russ)
  13. Bezzabotov Yu.S. Evaluation of the efficiency of low-temperature drying based on the energy analysis of processes in the elements of a drying installation / Yu.S. Bezzabotov, E.O. Ivchenko. *News of higher educational institutions. Food technology*. 2019;5-6 (371-372):84-86. – DOI 10.26297/0579-3009.2019.5-6.21.
  14. Bezzabotov Yu.S. Evaluation of the efficiency of low-temperature drying based on the energy analysis of processes in the elements of a drying installation / Yu.S. Bezzabotov, E.O. Ivchenko. *Electronic network polythematic journal “Scientific works of KubGTU”*. 2020; 1: 37-45. (In Russ)
  15. Zhlobo, R.A. Dependence of the compressibility coefficient of ethane on pressure at different temperatures / R.A. Zhlobo, A.S. Zaitsev. Promising materials and highly efficient processing processes: collection of materials of the All-Russian Youth Conference, Saratov, May 18–19, 2022. Saratov: Saratov State Technical University named after Yuri Gagarin, 2022; 73-75. (In Russ)
  16. Stepanova E.G. Investigation of the fish cooling process using binary ice / E.G. Stepanova, P.A. Zhlobo, I.E. Trofimenko. *Technologies of the food and processing industry of the agro-industrial complex - healthy food products*. 2022; 3:262-266. – DOI 10.24412/2311-6447-2022-3-262-266. (In Russ)
  17. Zhlobo, R.A. Modeling of the process of refrigeration effects on food products / R.A. Zhlobo, M.V. Shamarov, V.I. Aleshin. *Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science*. 2023;50(1): 24-32. – DOI 10.21822/2073-6185-2023-50-1-24-32. (In Russ)
  18. Modeling the process of defrosting ice cream to optimize its transportation / R.A. Zhlobo, M.V. Shamarov, E.G. Stepanova, B.Yu. Orlov. *Technologies of the food and processing industry of the agro-industrial complex - healthy food products*. 2023; 1:183-187. – DOI 10.24412/2311-6447-2023-1-183-187. (In Russ)
  19. Patent No. 2798054 C1 Russian Federation, IPC C13B 10/00, F25B 30/00. Beet processing department with a column diffusion apparatus: No. 2023104050: Appl. 02/22/2023: publ. 06/14/2023 / M. V. Shamarov, E. G. Stepanova, M. A. Pecheritsa [and others]; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Kuban State Technological University”.(In Russ)
  20. Stepanova E.G. Devices and technology of low-temperature systems / E.G. Stepanova, B.Yu. Orlov, R.A. Redneck. - Krasnodar: Kuban State Technological University, 2021; 292. – ISBN 978-5-8333-1086-1. (In Russ)
  21. Stepanova E. G., Zhlobo R. A. Heat pumps. - Krasnodar: Kuban State Technological University, 2023; 92. (In Russ)

**Сведения об авторах:**

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

Шамаров Максим Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры технологического оборудования и систем жизнеобеспечения; schmax@mail.ru

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

Ивченко Екатерина Олеговна, аспирант, кафедра технологического оборудования и систем жизнеобеспечения; ekaterina\_93123@mail.ru.

**Information about authors:**

Artyom S. Zaitsev, Graduate student, Department of Technological Equipment and Life Support Systems; tanketka.2013@mail.ru

Maksim V. Shamarov, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Assoc. Prof., Department of Technological Equipment and Life Support Systems; Schmax@mail.ru

Ruslan A. Zhlobo, Senior Lecturer, Department of Technological Equipment and Life Support Systems; Rzhlobo@bk.ru; ORCID 0000-0003-2568-2872

Ekaterina O. Ivchenko, Graduate student, Department of Technological Equipment and Life Support Systems;; ekaterina\_93123@mail.ru.

**Конфликт интересов/Conflict of interest.**

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

**Поступила в редакцию/Received 09.10.2023.**

**Одобрена после рецензирования Revised 29.10.2023.**

**Принята в печать/ Accepted for publication 29.10.2023.**

ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА  
ENERGY AND ELECTRICAL ENGINEERING

УДК 621.576.5

DOI: 10.21822/2073-6185-2023-50-4-26-36



Оригинальная статья /Original article

**Перспективы применения мембранной холодильной установки для производства холода как альтернатива абсорбционной**

**М.В. Шамаров<sup>1</sup>, Е.Г. Степанова<sup>1</sup>, А.В. Колинко<sup>1</sup>, А.М. Шамаров<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Кубанский государственный технологический университет,  
350072, г. Краснодар, ул.Московская, 2,Россия,

<sup>2</sup>Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова,  
2115054, Москва, Стремянный переулок, 36, Россия

**Резюме. Цель.** Целью исследования является определение перспективы применения мембранной холодильной установки для производства холода как альтернативы абсорбционной. **Метод.** Исследование проводилось с помощью численного эксперимента и проверки полученных результатов на экспериментальном стенде. **Результат.** Проведен анализ применения традиционной абсорбционной холодильной машины и мембранной холодильной машины с точки зрения энергоэффективности и количества рабочих элементов. Приведены для сравнения методики расчета процесса разделения смеси «абсорбент-холодильный агент» на основе процессов обратного осмоса и водоаммиачной абсорбционной холодильной установки. **Вывод.** Применение для производства холода в смесевых холодильных машинах процессов разделения в мембранных аппаратах, как альтернативы абсорбционным холодильным машинам, позволит обеспечить более стабильный процесс получения холодильного агента из смеси, снизит материальные затраты на производство холодильной установки и повысит энергоэффективность холодильной установки, работающей на смесевых компонентах.

**Ключевые слова:** холодильная установка, абсорбция, разделительная мембрана, селективность, площадь разделения, абсорбент, холодильный агент

**Для цитирования:** М.В. Шамаров, Е.Г. Степанова, А.В. Колинко, А.М. Шамаров. Перспективы применения мембранной холодильной установки для производства холода как альтернатива абсорбционной. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023; 50(4):26-36. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-4-26-36

**Prospects for the use of a membrane refrigeration unit for the production of cold as an alternative to absorption**

**M.V. Shamarov<sup>1</sup>, E.G. Stepanova<sup>1</sup>, A.V. Kolinko<sup>1</sup>, A.M. Shamarov<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Kuban State Technological University,

<sup>1</sup> 2 Moskovskaya St., Krasnodar 350072, Russia,

<sup>2</sup> G.V. Plekhanov Russian Economic University,

<sup>2</sup> 36 Stremyanny lane, Moscow 115054, Russia

**Abstract. Objective.** The purpose of the study is to determine the prospects for using a membrane refrigeration unit for the production of cold as an alternative to absorption. **Method.** The study was carried out using a numerical experiment and verification of the results obtained on an experimental bench. **Result.** An analysis was made of the use of a traditional absorption refrigeration machine and a membrane refrigeration machine from the point of view of energy efficiency and the number of working elements. Presented for comparison are methods for calculating the separation process of the “absorbent-refrigerant” mixture based on reverse osmosis processes and a water-ammonia absorption refrigeration unit. **Conclusion.** The use of separation processes in membrane apparatuses for the production of cold in mixed refrigeration machines, as an alternative to absorption refrigeration machines, will ensure a more stable process for obtaining

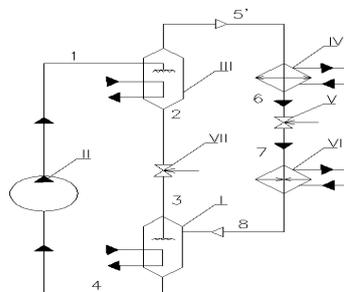
refrigerant from the mixture, reduce material costs for the production of a refrigeration unit and increase the energy efficiency of a refrigeration unit operating on mixed components .

**Keywords:** refrigeration unit, absorption, separation membrane, selectivity, separation area, absorbent, refrigerating agent

**For citation:** M.V. Shamarov, E.G. Stepanova, A.V. Kolinko, A.M. Shamarov. Prospects for the use of a membrane refrigeration unit for the production of cold as an alternative to absorption. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2023; 50(4):26-36. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-4-26-36

**Введение.** Процессы тепло- и массообмена в одноступенчатой абсорбционной холодильной машине (рис. 1) осуществляются с помощью ее основных элементов: генератора, конденсатора, дроссельного вентиля для хладагента, испарителя, дроссельного вентиля для раствора абсорбента, абсорбера и насоса раствора хладагент-абсорбент.

Тепловой расчет абсорбционной холодильной машины имеет цель определить полные и удельные тепловые потоки в аппаратах, теплового коэффициента машины и энергии, затрачиваемой в насосе раствора. Машины, работающие на водоаммиачном растворе, позволяют обеспечивать широкий спектр получаемых низких температур.

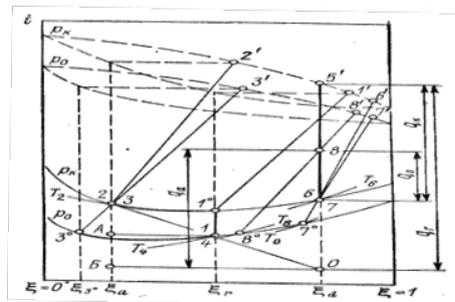


**Рис. 1.** Абсорбционная холодильная машина без теплообменника и ректификатора: I - абсорбер, II - насос раствора, III - генератор, IV - конденсатор, V - регулирующий вентиль хладагента, VI - испаритель, VII - регулирующий вентиль раствора

**Fig. 1.** Absorption refrigeration machine without heat exchanger and rectifier: I - absorber, II - solution pump, III - generator, IV - condenser, V - refrigerant control valve, VI - evaporator, VII - solution control valve

**Постановка задачи.** На рис. 2 приведены процессы, которые описывают цикл работы абсорбционной холодильной машины [7, 9, 14, 16, 22]. Температурный режим работы машины определяется тремя независимыми параметрами внешних источников теплоты: высшей температурой греющего источника  $T_{h1}$ , низшей температурой охлаждающей воды  $T_{w1}$ , являющейся температурой окружающей среды, определяющей процесс конденсации и низшей температурой охлаждаемого вещества  $T_{p2}$  – источника низкой температуры.

По известным или заданным температурным параметрам внешних источников определяются параметры жидкой и паровой фаз раствора в узловых точках циклов и изображаются процессы в термодинамической диаграмме (рис.2).



**Рис. 2.** Процессы, происходящие в абсорбционной холодильной машине в  $\xi$ -i диаграмме

**Fig. 2.** Processes occurring in an absorption refrigeration machine in the  $\xi$ -i diagram

В основе работы абсорбционной холодильной машины лежит процесс разделения смеси на хладагент и абсорбент, этот процесс происходит в генераторе при подводе

значительного количества теплоты. При этом хладагент, как вещество с нижекипящей температурой выпаривается из раствора абсорбента и далее поступает, как в обычной парокомпрессионной холодильной машине в конденсатор и через регулирующийся вентиль, дросселируется в испаритель, где отбирает теплоту от объекта или потока холодоносителя.

Слабый раствор, дросселируется параллельно в абсорбер, где поглощает пары хладагента, образующиеся и выходящие из испарителя (рис.1) [8, 10- 12, 17- 19]. Процесс разделения основывается на фазовом переходе хладагента, однако если процесс разделения осуществить без фазовых превращений хладагента в пар и обратно в жидкость, то можно получить более эффективный и экономичный режим работы холодильной машины, без значительных затрат тепловой энергии (рис. 3). Такой процесс разделения, без фазового перехода, возможно осуществить, применив для разделения аппараты и процессы мембранного разделения жидких растворов [1].

**Методы исследования.** Проведем сравнительный анализ энергетических показателей работы абсорбционной холодильной машины и холодильной машины, использующей для разделения мембранные модули, изготовленные на базе промышленно выпускаемой композиционной мембраны марки «Лестосил», которая состоит из тонкой пленки лестничного сополимера – поли (диметилсилоксана-ди(фенилсилоксана)), толщиной 5 мкм, нанесенной на подложку из фторопласта, который, в свою очередь, нанесен на капроновую сетку. Фторопластовая подложка и капроновая сетка являются дренажом мембраны и обеспечивают механическую прочность. Данный полимерный материал устойчив к среде аммиака и не теряет своих свойств (проницаемость, селективность) при длительной работе.

Исследование проводилось с помощью численного эксперимента и проверкой полученных результатов на экспериментальном стенде для исследования процесса мембранного разделения. [3, 4,13] Поскольку в испарителе обеих машин будет поступать не чистый хладагент, а его смесь с абсорбентом расчетное давление кипения  $P_0$  уменьшаются на величину  $\Delta P_0 = (0,01 \div 0,005)$  МПа, тогда  $P_0 = P'_0 - \Delta P_0$ . По значению  $T_0$  определяется высшая температура кипения в испарителе  $T_8 = T_0 + \Delta T$ . Значение  $(T_8 - T_0)$  зависит как от конструктивных особенностей испарителя, так и от концентрации исходного или кипящего раствора. Чем будет слабее концентрация раствора в испарителе, тем эта разность будет больше.

Рассмотрим устройство водоаммиачной смесевой холодильной установки, в которой для процесса разделения смеси, в которой хладагентом является аммиак, а вода абсорбентом, применяются полволоконные мембраны. При этом для такой схемы холодильной установки нет необходимости использовать генератор с источником теплоты и конденсатор, так как разделение смеси на компоненты будет осуществляться в мембранном блоке без изменения агрегатного состояния холодильного агента [2, 15].

На рис. 3 представлена схема одноступенчатой мембранной абсорбционной холодильной установки.

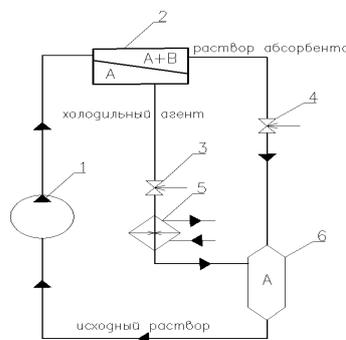


Рис. 3. Мембранная абсорбционная холодильная установка: 1 - насос, 2 – мембранный блок, 3, 4 – регулирующие вентили, 5 – испаритель, 6 – абсорбер

Fig. 3. Membrane absorption refrigeration unit: 1 - pump, 2 - membrane block, 3, 4 - control valves, 5 – evaporator, 6 – absorber

Модуль с полволоконными или трубчатыми мембранами для разделения жидких смесей состоит из пучка (связки) мембран в виде полых волокон-капилляров или труб, расположенных параллельно друг другу и заключенных в кожухе.

Пространство между мембранами ограничено кожухом модуля и рассматривается как внешнее пространство мембран. На кожухе с обеих противоположных сторон для подачи и отвода потока имеются патрубки, соединенные с внешним пространством мембран, и коллекторы, соединенные с внутренним пространством мембран.

Процессы течения во внутреннем и внешнем объеме мембран с поперечным проникновением из внутреннего объема мембран во внешний объем модуля описан работе [3].

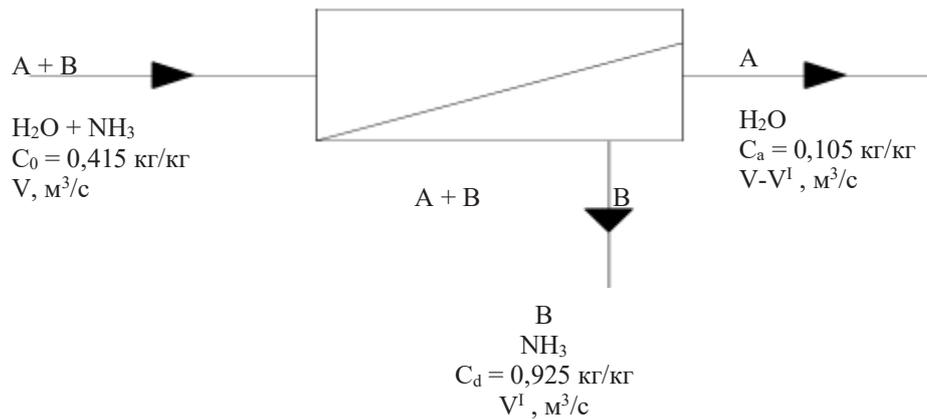


Рис. 4. Мембранный модуль

Fig. 4. Membrane module

В мембранном модуле, представленном на рис. 4, рассматривается следующее соотношение потоков:  $A+B$  – исходная смесь для разделения;  $A$  – растворитель ( $H_2O$  – абсорбент;  $B$  – компонент, растворенный в растворителе ( $NH_3$  – хладагент).

**Обсуждение результатов.** Осуществим расчет цикла работы и сопоставим энергетические показатели классической абсорбционной холодильной машины и мембранной абсорбционной холодильной машины. Для расчета циклов абсорбционных холодильных машин должны быть заданы следующие внешние условия: рабочее тело и абсорбент; высшая температура греющего источника; низшая температура охлаждающего источника (температура окружающей среды).

Для расчета циклов абсорбционных холодильных машин кроме перечисленных условий должна быть задана высшая температура охлаждаемого источника.

По заданным параметрам внешних источников, пользуясь термодинамическими диаграммами и таблицами термодинамических параметров равновесных фаз растворов, вписывают обратный цикл работы машины в диаграмму, определяют термодинамические параметры рабочего тела и абсорбента в узловых точках циклов, рассчитывают удельные тепловые потоки в аппаратах, составляют тепловой баланс машины и определяют значение теплового коэффициента, характеризующего термодинамическую эффективность циклов и схемы машины [20, 21].

Примем для анализа следующие параметры работы сравниваемых холодильных машин. Рассчитаем тепловые потоки водоаммиачной абсорбционной холодильной машины без теплообменника и ректификатора.

Исходные данные для расчета: давление греющего насыщенного пара  $P_h$ , МПа – 0,5886; температура охлаждающей воды  $T_{w1}$ , К – 293; температура охлаждаемого рассола  $T_{s2}$ , К – 263.

Принятые значения температур и давления раствора следующие. Температура греющего пара при  $p_h = 0,5886$  МПа примерно равна  $T_h = 430$  К.

Высшая температура кипения раствора в генераторе составит:  $T_2 = T_k - \Delta T = 430 - 7 = 423$  К. Низшая температура раствора в конденсаторе  $T_6 = T_{w1} + \Delta T = 293 + 5 = 298$  К.

Давление в конденсаторе и генераторе определяется по температуре конденсации чистого аммиака  $T = 298$  К, что составляет  $p = 1,0006$  МПа.

Низшая температура раствора в абсорбере при условии параллельной подачи воды в конденсатор и абсорбер составит:

$$T_4 = T_{w1} + \Delta T = 293 + 5 = 298 \text{ К.}$$

Высшая температура раствора в испарителе:  $T_8 = T_{s2} = 263$  К. Низшая температура раствора в испарителе (при обязательном условии  $\xi_7 < \xi_d$ ):

$$T_0 = T_7 = T_{s2} - \Delta T = 263 - 4 = 259 \text{ К}$$

Давление в испарителе и абсорбере:  $p_0 = p'_0 - \Delta p_0 = 0,2466 - 0,0504 = 0,1962$  МПа, где  $p'_0$  – давление насыщенного аммиачного пара при  $T_0 = 259$  К.

По диаграмме  $\xi - I$  для водоаммиачного раствора с учетом исходных данных определены параметры узловых точек цикла работы, согласно рис. 2 приведены в табл. 1.

**Таблица 1. Параметры узловых точек цикла работы**

**Table 1. Parameters of work cycle nodes**

Состояние вещества/ State of matter	T, К	p, МПа	$\xi$ , кг/кг	i, Дж/кг
<b>Жидкость/ Liquid:</b>				
после генератора state of matter	$T_2 = 423$	$p = 1,0006$	$\xi_a = 0,105$	561,46
после абсорбера after the absorber	$T_4 = 298$	$p_0 = 0,1962$	$\xi_r = 0,415$	-142,46
в начале кипения в генераторе at the beginning of boiling in the generator	$T_1 = 352$	$p = 1,0006$	$\xi_r = 0,415$	111,04
после конденсатора after the capacitor	$T_6 = 298$	$p = 1,0006$	$\xi_d = 0,878$	20,95
в конце кипения в испарителе at the end of boiling in the evaporator	$T_8 = 263$	$p_0 = 0,1962$	$\xi_8 = 0,726$	-228,36
<b>Пар: Steam:</b>				
равновесный крепкому раствору в генераторе equilibrium with a strong solution in the generator	$T_1 = 352$	$p = 1,0006$	$\xi_{1'} = 0,970$	1470,69
равновесный слабому раствору в генераторе equilibrium with a strong solution in the generator	$T_2 = 423$	$p = 1,0006$	$\xi_{2'} = 0,535$	2136,9
в конце кипения в испарителе at the end of boiling in the evaporator	$T_8 = 263$	$p_0 = 0,1962$	$\xi_d = 0,878$	609,64
выходящий из генератора при $\zeta_m = 0,260$ кг/кг leaving the generator at $\xi_m = 0.260$ kg/kg.	$T_{5'} = 385$	$p = 1,0006$	$\xi_d = 0,878$	1657,14

В результате получим следующие удельные энергетические характеристики цикла работы абсорбционной холодильной машины.

Кратность циркуляции раствора составит:

$$f = \frac{\xi_d - \xi_a}{\xi_r - \xi_a} = \frac{0,878 - 0,105}{0,415 - 0,105} = 2,494 \text{ кг/кг.} \quad (1)$$

Удельная теплота, подводимая в генераторе:

$$q_a = i_{5'} - i_2 + f(i_2 - i_4) = 1657,14 - 561,46 + 2,494(561,46 + 142,46) = 2851,29 \text{ кДж/к} \quad (2)$$

Удельная теплота, отводимая в конденсаторе:

$$q_0 = i_8 - i_6 = 609,64 - 20,95 = 588,69 \text{ кДж/кг.} \quad (3)$$

Удельная теплота, подводимая в испарителе

$$q_0 = i_8 - i_6 = 609,64 - 20,95 = 588,69 \text{ кДж/кг.} \quad (4)$$

Удельная теплота, отводимая от абсорбера:

$$q_a = i_8 - i_2 + f(i_2 - i_4) = 609,64 - 561,46 + 2,494(561,46 + 142,46) = 1803,79 \text{ кДж/кг.} \quad (5)$$

Для тех же исходных данных проводится расчет удельных энергетических показателей работы для мембранной холодильной машины.

Разделение раствора на компоненты осуществляется без изменения агрегатного

состояния холодильного агента в модуле, оснащённом полуволоконными мембранами [5, 6].

При бесконечно тонкой мембране скорость уменьшения количества диффундирующего вещества в одной ячейке (объём  $V^I$ ) равна скорости увеличения в другой (объём  $V^{II}$ ) и определяется стационарным диффузионным потоком через мембрану:

$$\bar{V}^I dC^I = -V^{II} dC^{II} = -\frac{D \left( \bar{C}^{II} - \bar{C}^I \right)}{l} dl \quad (6)$$

Здесь  $C^I, C^{II}$  - концентрации диффундирующего вещества соответственно в объёмах  $V^I$  и  $V^{II}$ ,  $\bar{C}^I, \bar{C}^{II}$  - концентрации диффундирующего вещества внутри мембраны у поверхностей, примыкающих соответственно к объёмам  $V^I$  и  $V^{II}$ .

Из закона сохранения массы вещества следует:

$$V^I C^I + V^{II} C^{II} = (V^I + V^{II}) C_\infty = V^I C_0^I + V^{II} C_0^{II}. \quad (7)$$

После соответствующей подстановки из уравнения (7) в уравнение (6) получим дифференциальное уравнение разделения:

$$\frac{V^I V^{II}}{V^I + V^{II}} dC^I = -\frac{D \sigma}{l} S (C_\infty - C^I) dt, \quad (8)$$

где  $S$  - площадь мембраны.

При постоянно обновляющемся растворе в одной из секций ячейки, т. е. при  $V^{II} \rightarrow \infty$ ,

$$\text{получаем} \quad \frac{C^I - C_0}{C_\infty - C_0} = \exp \left[ \frac{D \sigma S}{V^I l} t \right], \quad (9)$$

где  $D$  – коэффициент диффузии;  $l$  – толщина мембраны;

$\bar{\sigma}$  - коэффициент растворимости, который определяется соотношением:

$$\bar{\sigma} = \frac{\bar{C}^I}{C^I},$$

где  $\bar{C}^I$  - концентрация диффундирующего вещества в объёме  $V^I$ ;

$\bar{C}^{II}$  - концентрация диффундирующего вещества внутри мембраны.

На основании материального баланса внутри мембранного блока определяем кратность циркуляции исходного и рабочего растворов:

$$V \cdot C_0 = V_I \cdot C_d + (V - V_I) \cdot C_a, \quad (10)$$

после преобразований получим:

$$\frac{V}{V_I} = \frac{C_d - C_a}{C_0 - C_a}. \quad (11)$$

Идентичность выражений (1) и (11) позволяет сделать вывод о том, что для построения процесса разделения в мембранном блоке и нахождения параметров растворов после разделения возможно применение методики аналогичной абсорбционной холодильной машине, с учетом отсутствия фазового перехода.

Для сопоставления параметров работы абсорбционной холодильной машины и мембранного блока примем, что холодопроизводительность обеих установок составит 500 кВт. При этих условиях массовый расход холодильного агента в абсорбционной холодильной установке составит:

$$m_0 = \frac{Q_0}{q_0}. \quad (12)$$

При разделении в мембране фазовый переход не осуществляется, поэтому в предельном состоянии разделения концентрацию получаемого вещества определяют по  $I - \xi$  – диаграмме при пересечении луча  $t = \text{const}$ , проведенного от точки начала сжатия в насосе для давления разделения.

В рассматриваемом случае конечная концентрация холодильного агента (компонента В) составит  $C_d = 0,925$  кг/кг. При этом удельная теплота, отводимая в испарителе, составит:

$$q_{0M} = (i_{1'_{\text{м}}} - i_{6_{\text{м}}}) \cdot C_d = (450 - 60) \cdot 0,925 = 360,75 \text{ ккал / кг} = 1510,46 \text{ кДж/кг} \quad (13)$$

Тогда количество жидкого холодильного агента, необходимого для отвода теплоты в испарителе составит:

$$m_{0M} = \frac{Q_0}{q_{0M}} = \frac{500}{1510,46} = 0,331 \text{ кг / с}.$$

Объемные расходы холодильного агента в обеих холодильных машинах, необходимые для работы насосов и определяющие эффективную площадь мембранного блока определяются по формуле:

$$V_I = \frac{m_0}{\rho_{\text{ХА}}}, \quad (14)$$

где  $\rho_{\text{ХА}}$  – плотность жидкого холодильного агента в испарителе, кг/м<sup>3</sup>.

Учитывая кратность циркуляции согласно (1) и (11). Получим, что объемный расход в обеих холодильных установках составит, м<sup>3</sup>/с:

$$V = f \cdot V_I. \quad (15)$$

Площадь мембранного блока  $F_M$ , м<sup>2</sup> определится по соотношению:

$$F_M = \frac{V \cdot \rho_{\text{ХА}}}{G},$$

где  $G$  – средняя проницаемость мембраны, моль/(м<sup>2</sup> С Па).

Для рассматриваемой мембраны «Листосил» по экспериментальным данным [5], средняя проницаемость аммиака составляет 4622 10-10 моль/(м<sup>2</sup> С Па).

Для начальной концентрации раствора хладагента, получаемого после разделения в мембранной холодильной установке в пределах от 0,787% (соответствующего работе АБХМ) до 0,992% проведен анализ энергетических и материальных параметров, влияющих на процессы разделения и ее холодопроизводительность.

Зависимость изменения удельной холодопроизводительности установки с учетом установившейся конечной концентрации представлена на рис. 5-7.

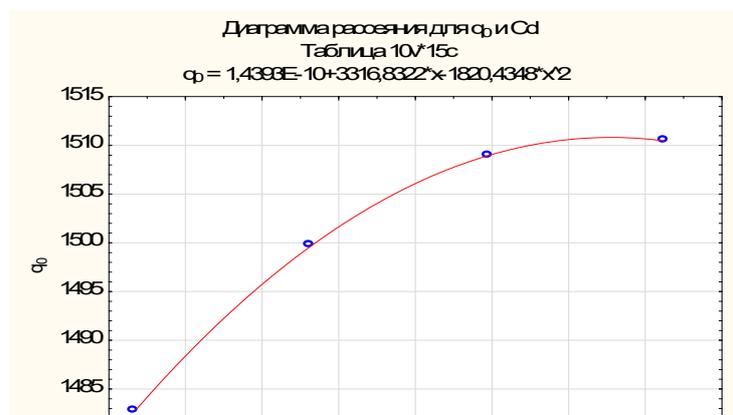
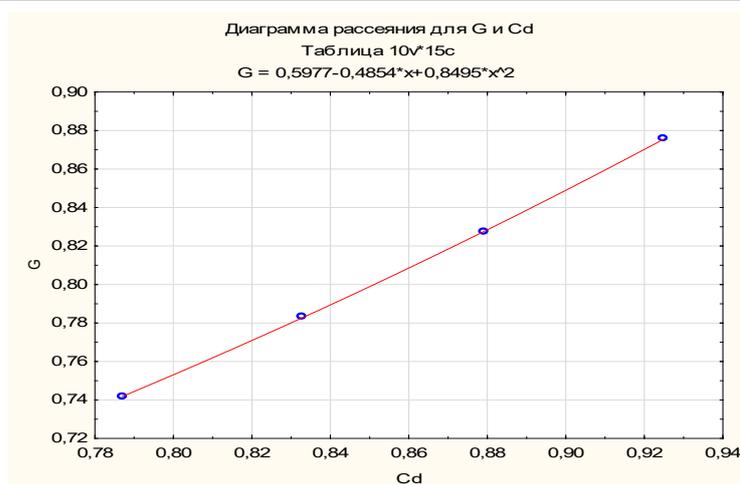
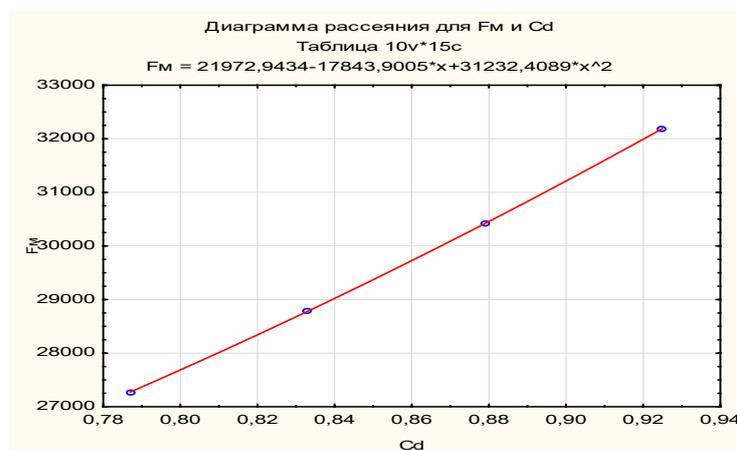


Рис. 5. Изменение удельной холодопроизводительности мембранной холодильной установки в зависимости от параметров разделения смеси

Fig. 5. Change in specific refrigeration capacity of a membrane refrigeration unit depending on the mixture separation parameters



**Рис.6. Зависимость изменения общего количества раствора для работы мембранной холодильной установки в зависимости от параметров разделения**  
**Fig.6. Dependence of changes in the total amount of solution for the operation of a membrane refrigeration unit depending on separation parameters**



**Рис.7. Фактическая общая площадь мембранных модулей необходимых для разделения смеси в мембранной холодильной установке с заданными параметрами**  
**Fig.7. Actual total area of membrane modules required to separate the mixture in a membrane refrigeration unit with given parameters**

**Вывод.** Результаты расчетов позволяют судить о перспективности применения мембранных холодильных машин. В настоящее время работы направлены на создание экспериментального стенда и практического подтверждения полученных теоретических результатов.

**Библиографический список:**

1. Дытнерский Ю. И. Основные процессы и аппараты химической технологии / Под ред. Ю.И. Дытнерского, 2-е изд., перераб. и дополн. - М.: Химия, 1991. - 496 с.
2. Беляев В.П. Абсорбционно-мембранная установка. RU 2 295 677 С2, Опубл. 20.03.2007, Бюл. № 8.
3. Kelsey L.J., Pillarella M.R., Zydney A.L. Theoretical analysis of convective flow profiles in a hollow-fiber membrane bioreactor // Chem. Engng Sci. – 1990. – 45. – P. 3211–3220.
4. Андреев И.А. Мембранные технологии разделения раствора в абсорбционной холодильной установке / И.А. Андреев, М.В. Шамаров // В сборнике: Механика, оборудование, материалы и технологии. Электронный сборник научных статей по материалам третьей международной научно-практической конференции. 2020. С. 973-975.
5. Хванг С.-Т., Каммермеер К. Мембранные процессы разделения: Пер. с англ. Под ред. Проф. Дытнерского Ю.И. – М.: Химия, 1981. – 464 с., ил.
6. Николаев Н.И. Диффузия на мембранах. – М.: Химия, 1980. – 232 с., ил.
7. Андреев И.А. Перспективы применения углекислотных холодильных машин в системах холодоснабжения/ И.А. Андреев, М.В. Шамаров// В сборнике: Механика, оборудование, материалы и

- технологии. 4 международная научно-практическая конференция. Краснодар, 2021. С. 518-526
8. Шамаров М.В. Анализ массогабаритных показателей поршневого компрессора для передвижной компрессорной станции / М.В. Шамаров, М.Ю. Мелёхина // В сборнике: Современные технологии машиностроительного производства, инновационные направления развития компрессорной техники и газоразделительных систем. сборник докладов Международной научно-практической конференции, посвященной 60-летию ОАО «Компрессорный завод «БОРЕЦ». ФГБОУ ВПО «КубГТУ», ОАО «Компрессорный завод «БОРЕЦ», ООО «Издательский Дом - Юг». 2013. С. 50-53.
  9. Шамаров М.В. Мембранная абсорбционная холодильная установка // В книге: Инновационные направления интеграции науки, образования и производства. Сборник тезисов докладов участников I Международной научно-практической конференции. Под общей редакцией Е.П. Масюткина. 2020. С. 209-211.
  10. Шамаров М.В. Особенности математической модели холодильного поршневого компрессора с внешним кипящим охлаждением/ М.В. Шамаров, Ю.С. Беззаботов // В сборнике: Механика, оборудование, материалы и технологии. Электронный сборник научных статей по материалам третьей международной научно-практической конференции. 2020. С. 976-980.
  11. Шамаров М.В. Использование прикладного моделирования при проектировании каскадной холодильной установки /М.В. Шамаров, А.М. Шамаров// В сборнике: Материалы пула научно-практических конференций. Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского; Керченский государственный морской технологический университет; Луганский государственный педагогический университет ; Луганский государственный университет имени Владимира Даля. Керчь, 2023. С. 214-218.
  12. Шамаров А.М. Разработка математической модели при проектировании двигателя стирлинга/ А.М. Шамаров, И.Е. Сязин, М.В. Шамаров// В сборнике: Инновационные направления интеграции науки, образования и производства. Сборник материалов IV Международной научно-практической конференции. Керчь, 2023. С. 48-53.
  13. Губский В.С. Осушка и очистка природного газа посредством полимерных мембран / В.С. Губский, М.В. Шамаров // В сборнике: Механика, оборудование, материалы и технологии. Электронный сборник научных статей по материалам международной научно-практической конференции. Краснодар, 2022. С. 566-573.
  14. Андреев И.А. Синергетика использования абсорбционных холодильных машин / И.А. Андреев, Ю.С. Беззаботов, М.В. Шамаров // В сборнике: Механика, оборудование, материалы и технологии. Электронный сборник научных статей по материалам международной научно-практической конференции. Краснодар, 2022. С. 573-578.
  15. Зайцев А.С. Технология изготовления полуволоконной мембраны на основе полимерных волокон для сепарации газов / А.С. Зайцев, М.В. Шамаров// В сборнике: Механика, оборудование, материалы и технологии. Электронный сборник научных статей по материалам международной научно-практической конференции. Краснодар, 2022. С. 585-590.
  16. Соянок В.В. Особенности проектирования и применения абсорбционных холодильных машин / В.В. Соянок, М.В. Шамаров// В сборнике: Молодежная наука. Сборник лучших научных работ молодых ученых. Общеуниверситетская Студенческая научная конференция (СНК-2020). Краснодар, 2021. С. 156-160.
  17. Шамаров М.В. Создание холодильного поршневого компрессора с внешним охлаждением кипящим хладагентом. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Краснодар, 2000.
  18. Способ испарительного охлаждения компрессора холодильной установки Шляховецкий В.М., Черных А.И., Шляховецкий Д.В., Шамаров М.В. Патент на изобретение RU 2117222 С1, 10.08.1998. Заявка № 96114535/06 от 16.07.1996.
  19. Крышка блока цилиндров многорядного компрессора Шляховецкий В.М., Шамаров М.В. Патент на изобретение RU 2139447 С1, 10.10.1999. Заявка № 97105117/06 от 02.04.1997.
  20. Шамаров М.В. Экспресс заморозка жидких продуктов для проведения анализа/ М.В. Шамаров, Д.А. Шилько // Сборник: Инновационные технологии в пищевой промышленности: наука, образование и производство. материалы V Международной научно-технической конференции. 2018. С. 741-745.
  21. Евтишин И.А. Самоочищающаяся фильтрационная установка для жидких пищевых продуктов/ И.А. Евтишин, М.В. Шамаров // В сборнике: Пища. Экология. Качество. Сборник материалов XVI Международной научно-практической конференции. Ответственные за выпуск: О.К. Мотовилов, О.А. Высоцкая, К.Н. Нициевская, Л.П. Хлебова. 2019. С. 260-264.
  22. Шамаров М.В. Альтернативные источники энергии для работы тепловых насосов М.В. Шамаров, В.М. Сазоненко// В сборнике: механика, оборудование, материалы и технологии. Электронный сборник научных статей по материалам международной научно-практической конференции. Редакционная коллегия: Литвинов А.Е., Пломодьяло Р.Л., Коновалова Т.В., Гукасян А.В., Война А.А., Вольченко Н.А., 2019. С. 445-449.

### References

1. Dytnersky Yu. I. Basic processes and apparatus of chemical technology. Ed. Yu. I. Dytnersky, 2nd ed., revised. and additional. M.: *Chemistry*, 1991; 496. (In Russ)
2. Belyaev V.P. Absorption membrane installation. RU 2 295 677 C2, Publ. 03/20/2007, Bulletin. No. 8. (In Russ)
3. Kelsey L.J., Pillarella M.R., Zydney A.L. Theoretical analysis of convective flow profiles in a hollow-fiber membrane bioreactor. *Chem. Engng Sci.* 1990; 45: 3211–3220.
4. Andreev I.A. Membrane technologies for solution separation in an absorption refrigeration unit. I.A. Andreev, M.V. Shamarov. In the collection: *Mechanics, equipment, materials and technologies. Electronic collection of scientific articles based on the materials of the third international scientific and practical conference.* 2020; 973-975. (In Russ)
5. Hwang S.-T., Kammermeer K. Membrane separation processes: Transl. from English Ed. Prof. Dytnersky Yu.I. M.: *Chemistry*, 1981;464 (In Russ)
6. Nikolaev N. I. Diffusion on membranes. M.: *Chemistry*, 1980: 232l. (In Russ)
7. Andreev I.A. Prospects for the use of carbon dioxide refrigeration machines in refrigeration supply systems. I.A. Andreev, M.V. Shamarov. In the collection: *Mechanics, equipment, materials and technologies. 4th international scientific and practical conference.* Krasnodar, 2021; 518-526. (In Russ)
8. Shamarov M.V. Analysis of weight and size indicators of a piston compressor for a mobile compressor station / M.V. Shamarov, M.Yu. Melyokhina. In the collection: *Modern technologies of mechanical engineering production, innovative directions for the development of compressor equipment and gas separation systems. collection of reports of the International Scientific and Practical Conference dedicated to the 60th anniversary of OJSC Compressor Plant BORETS. FSBEI HPE "KubSTU", OJSC "Compressor Plant "BORETS", LLC "Publishing House - South".* 2013; 50-53. (In Russ)
9. Shamarov M.V. Membrane absorption refrigeration unit // In the book: *Innovative directions for the integration of science, education and production. Collection of abstracts of reports of participants of the I International Scientific and Practical Conference.* Under the general editorship of E.P. Masyutkina. 2020; 209-211.
10. Shamarov M.V., Bezzabotov Yu.S. Features of the mathematical model of a refrigeration piston compressor with external boiling cooling.. In the collection: *Mechanics, equipment, materials and technologies. Electronic collection of scientific articles based on the materials of the third international scientific and practical conference.* 2020; 976-980.
11. Shamarov M.V., Shamarov A.M. The use of applied modeling in the design of a cascade refrigeration unit In the collection: *Materials of a pool of scientific and practical conferences. Donetsk National University of Economics and Trade named after Mikhail Tugan-Baranovsky; Kerch State Marine Technological University; Lugansk State Pedagogical University; Lugansk State University named after Vladimir Dahl.* Kerch, 2023; 214-218. (In Russ)
12. Shamarov A.M., Shamarov A.M., Syazin I. E., Shamarov M.V. Development of a mathematical model when designing a Stirling engine. In the collection: *Innovative directions for the integration of science, education and production. Collection of materials from the IV International Scientific and Practical Conference.* Kerch, 2023; 48-53. (In Russ)
13. Gubsky V.S., Gubsky V.S., Shamarov M.V. Drying and purification of natural gas using polymer membranes. In the collection: *Mechanics, equipment, materials and technologies. Electronic collection of scientific articles based on materials from the international scientific and practical conference.* Krasnodar, 2022; 566-573. (In Russ)
14. Andreev I.A. Synergetics of the use of absorption refrigeration machines / I.A. Andreev, Yu.S. Bezzabotov, M.V. Shamarov. In the collection: *Mechanics, equipment, materials and technologies. Electronic collection of scientific articles based on materials from the international scientific and practical conference.* Krasnodar, 2022; 573-578. (In Russ)
15. Zaitsev A.S., Zaitsev A.S., Shamarov M.V. Manufacturing technology of a hollow fiber membrane based on polymer fibers for gas separation. In the collection: *Mechanics, equipment, materials and technologies. Electronic collection of scientific articles based on materials from the international scientific and practical conference.* Krasnodar, 2022; 585-590. (In Russ)
16. Soyank V.V. Features of the design and application of absorption refrigeration machines. V.V. Soyank, M.V. Shamarov. In the collection: *Youth science. Collection of the best scientific works of young scientists. University-wide Student Scientific Conference (SNK-2020).* Krasnodar, 2021; 156-160. (In Russ)
17. Shamarov M.V. Creation of a refrigeration piston compressor with external cooling by boiling refrigerant // dissertation for the degree of candidate of technical sciences. Krasnodar, 2000. (In Russ)
18. Method of evaporative cooling of a compressor of a refrigeration unit Shlyakhovetsky V.M., Chernykh A.I., Shlyakhovetsky D.V., Shamarov M.V. Patent for invention RU 2117222 C1, 08/10/1998. Application No. 96114535/06 dated July 16, 1996. (In Russ)
19. Cylinder block cover of a multi-row compressor Shlyakhovetsky V.M., Shamarov M.V. Patent for invention

RU 2139447 C1, 10.10.1999. Application No. 97105117/06 dated 04/02/1997. (In Russ)

20. Shamarov M.V. Express freezing of liquid products for analysis / M.V. Shamarov, D.A. Shilko. In the collection: Innovative technologies in the food industry: science, education and production. materials of the V International Scientific and Technical Conference. 2018; 741-745. (In Russ)
21. Evtishin I.A. Self-cleaning filtration unit for liquid food products/ I.A. Evtishin, M.V. Shamarov // In the collection: Food. Ecology. Quality. Collection of materials of the XVI International Scientific and Practical Conference. Responsible for the release: O.K. Motovilov, O.A. Vysotskaya, K.N. Nitsievskaya, L.P. Khlebova. 2019; 260-264. (In Russ)
22. Shamarov M.V. Alternative energy sources for the operation of heat pumps M.V. Shamarov, V.M. Sazonenko. In the collection: mechanics, equipment, materials and technologies. Electronic collection of scientific articles based on materials from the international scientific and practical conference. Editorial board: Litvinov A.E., Plomodyalo R.L., Konovalova T.V., Gukasyan A.V., Voina A.A., Volchenko N.A., 2019; 445-449. (In Russ)

#### **Сведения об авторах**

Шамаров Максим Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры технологического оборудования и систем жизнеобеспечения; schmax@mail.ru

Степанова Евгения Григорьевна, кандидат технических наук, доцент кафедры технологического оборудования и систем жизнеобеспечения; egs2128@mail.ru

Колинько Алексей Владимирович, аспирант кафедры технологического оборудования и систем жизнеобеспечения; schmax@mail.ru

Шамаров Артем Максимович, студент, Высшая школа кибертехнологий, математики и статистики; schmax@mail.ru

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

Maxim V. Shamarov, Cand. Sci. (Eng), Assoc. Prof. , Department of technological equipment and life support systems; schmax@mail.ru

Evgenia G. Stepanova, Cand. Sci. (Eng), Assoc. Prof. , Department of technological equipment and life support systems; egs2128@mail.ru

Alexey V. Kolinko, Graduate Student, Department of Technological Equipment and Life Support Systems; schmax@mail.ru

Artem M. Shamarov, Student, Higher School of Cyber Technologies, Mathematics and Statistics; schmax@mail.ru

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

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

**Поступила в редакцию/Received 12.10.2023.**

**Одобрена после рецензирования/ Revised 29.10.2023.**

**Принята в печать/Accepted for publication 29.10.2023.**

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ**  
**INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS**

УДК 004.421



DOI: 10.21822/2073-6185-2023-50-4-37-50

Оригинальная статья/Original article

**Построение параллельных одномерных интерполяторов на C++**

**Ф.В. Абилова<sup>1</sup>, М.В. Абилов<sup>1</sup>, Э.В. Селимханов<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Дагестанский государственный технический университет,

<sup>1</sup>367026, г. Махачкала, пр. И. Шамиля, 70, Россия,

<sup>2</sup>ООО «РН-БашНИПИНефть»,

<sup>2</sup>450006, г. Уфа, ул. Ленина, д. 86/1, Россия

**Резюме. Цель.** Целью работы является исследование и разработка интерполяторов на языке программирования C++, включая линейный, квадратичный и кубический интерполяторы, а также одномерный RBF-интерполятор. Основными задачами являются использование библиотеки GSL, интерполяционного многочлена Лагранжа, OpenMP, и сравнительный анализ с библиотекой SciPy. Эксперименты направлены на оценку эффективности и применимости различных методов интерполяции. **Методы.** Используются библиотеки GSL и Eigen для реализации интерполяторов и оптимизации вычислительных процессов. Для сравнения производительности применяются линейный, квадратичный и кубический интерполяторы, а также разрабатывается одномерный RBF-интерполятор. Метод интерполяции Лагранжа и параллельные вычисления с использованием OpenMP и SIMD-инструкций также используются для повышения эффективности. **Результат.** Результаты исследования включают в себя успешную разработку и реализацию различных методов интерполяции на языке C++. Особое внимание уделяется анализу производительности и точности каждого метода. Путем сравнительного анализа с библиотекой SciPy выявлены преимущества и недостатки различных интерполяторов. Основным результатом - практическая применимость этих методов в контексте конкретных задач интерполяции. **Вывод.** Реализация интерполяторов на языке C++ обладает некоторыми значительными преимуществами по сравнению с использованием библиотеки SciPy. C++ позволяет более точное и быстрое управление вычислениями, что особенно важно в задачах, связанных с численными методами интерполяции. Библиотеки GSL и Eigen предоставляют мощные инструменты для оптимизации и высокопроизводительных вычислений, что позволяет добиваться высокой эффективности при реализации интерполяции на C++.

**Ключевые слова:** интерполяция, C++, GSL, радиально-базисные функции, Eigen, OpenMP, SIMD, интерполяционный многочлен Лагранжа, SciPy

**Для цитирования.** Ф.В. Абилова, М.В. Абилов, Э.В. Селимханов. Построение параллельных интерполяторов на C++. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023; 50(4):37-50. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-4-37-50

**Construction of parallel one-dimensional interpolators in C++**

**F.V. Abilova<sup>1</sup>, M.V. Abilov<sup>1</sup>, E.V. Selimkhanov<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Daghestan State Technical University,

<sup>1</sup> 70 I. Shamil Ave., Makhachkala 367026, Russia,

<sup>2</sup> LLC "RN-BashNIPIneft",

<sup>2</sup> 86/1 Lenina St., Ufa 450006, Russia

**Abstract. Objective.** The purpose of this article is to research and develop interpolators in the C++ programming language, including linear, quadratic and cubic interpolators, as well as a one-dimensional RBF interpolator. The main tasks are the use of the GSL library, the Lagrange interpolation polynomial, OpenMP, and comparative analysis with the SciPy

library. The experiments are aimed at evaluating the effectiveness and applicability of various interpolation methods. **Method.** The work uses the GSL and Eigen libraries to implement interpolators and optimize computational processes. Linear, quadratic, and cubic interpolators are used to compare performance, and a one-dimensional RBF interpolator is being developed. The Lagrange interpolation method and parallel computing using OpenMP and SIMD are also used to improve efficiency. **Result.** The results of the research include the successful development and implementation of various interpolation methods in C++. Particular attention is paid to the analysis of the performance and accuracy of each method. Through a comparative analysis with the SciPy library, the authors identify the advantages and disadvantages of various interpolators. The main result is the practical applicability of these methods in the context of specific interpolation problems. **Conclusion.** The study made it possible to make sure that the implementation of interpolators in the C++ language has some significant advantages compared to using the SciPy library. In particular, C++ allows for more precise and faster control over calculations, which is especially important in tasks related to numerical interpolation methods. The GSL and Eigen libraries provide powerful tools for optimization and high performance computing, which allows you to achieve high efficiency when implementing interpolation in C++.

**Keywords:** Interpolation, C++, GSL, Radial Basis Functions, Eigen, OpenMP, SIMD, Lagrange Interpolation Polynomial, SciPy

**For citation.** F.V. Abilova, M.V. Abilov, E.V. Selimkhanov. Construction of parallel one-dimensional interpolators in C++. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2023; 50(4):37-50. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-4-37-50

**Введение.** Интерполяция играет ключевую роль в множестве приложений, начиная от визуализации данных до численных методов в науке и инженерии. Эффективная интерполяция имеет решающее значение для точности и производительности таких приложений. В данной статье мы исследуем создание одномерных интерполяторов на C++, включая линейные, квадратичные, кубические и радиально-базисные функции (RBF) интерполяторы. Чтобы достичь максимальной производительности, мы воспользуемся мощными библиотеками и технологиями, такими как OpenMP, включая SIMD (парадигма “single instruction, multiple data”) инструкции, и библиотека Eigen для работы с линейной алгеброй. Эти средства позволят нам оптимизировать интерполяторы и улучшить их многозадачность, что особенно актуально в современных многозадачных вычислительных средах. Особое внимание уделяется сравнению производительности наших C++ интерполяторов с аналогичными интерполяторами, реализованными на языке Python [1,9].

**Постановка задачи.** Наша цель – реализовать и продемонстрировать значительное преимущество в скорости, которое может быть достигнуто с помощью оптимизированных алгоритмов на C++ в сравнении с интерполяцией на Python (библиотека Scipy).

Задачи, поставленные в данной статье, включают в себя:

1. **Реализация интерполяторов:** Разработка и реализация интерполяторов, основанных на различных методах, включая линейную, квадратичную, кубическую интерполяцию и RBF-интерполяцию. Все интерполяторы будут созданы с использованием языка программирования C++.
2. **Оптимизация с OpenMP и SIMD:** Применение технологии OpenMP и SIMD для оптимизации вычислений в интерполяторах. Это включает в себя распараллеливание [10] и векторизацию вычислений [11] для увеличения производительности на многоядерных [12] системах.
3. **Использование библиотеки Eigen:** Внедрение библиотеки Eigen для выполнения операций линейной алгебры, что может значительно улучшить эффективность и устойчивость интерполяции.
4. **Сравнение с Python:** Сравнение производительности наших C++ интерполяторов с

аналогичными интерполяторами, реализованных в специализированных библиотеках, таких как SciPy на языке Python, с целью продемонстрировать преимущества высокооптимизированных алгоритмов на C++.

- 5. Оценка результатов:** Проведение тестовых экспериментов для оценки точности и производительности различных интерполяторов на разных типах данных и объемах данных.

**Методы исследования.** Для построения линейных и кубических интерполяторов мы использовали библиотеку GSL (GNU Scientific Library) и её методы интерполяции.

Общая схема использования интерполятора выглядит следующим образом. Например, построение линейного интерполятора происходит командой

```
linear_interpolator interp(xp, yp);,
```

где «xp» и «yp» – исходные наборы иксов и игреков.

Далее, использование построенного интерполятора для искомого набора точек «x» выглядит так `auto y = interp(x)`.

Рассмотрим шаблонный класс [1], реализующий линейную интерполяцию методами GSL, являющийся по сути удобной C++-оберткой, инкапсулирующий в себе C-интерфейс библиотеки.

```
template<class T, class Value = T::value_type>
class linear_interpolator {
public:
    linear_interpolator(T xp, T yp) :
        xp_(std::move(xp)), yp_(std::move(yp)),
        interp(gsl_spline_alloc(gsl_interp_linear, xp_.size())) {
        gsl_spline_init(interp, xp_.data(), yp_.data(), xp_.size());
    }
    linear_interpolator(const linear_interpolator &) = delete;
    linear_interpolator &operator=(const linear_interpolator &) = delete;
    linear_interpolator(linear_interpolator &&) noexcept = delete;
    linear_interpolator &operator=(linear_interpolator &&) noexcept = delete;
    ~linear_interpolator() {
        gsl_spline_free(interp);
    }
    auto operator()(const T &x) const -> T {
        T y(x.size());
        bool omp_opt = x.size() >= 10000;
        auto num_t = max_threads / 2 > 8 ? 8 : max_threads / 2;
#pragma omp parallel for simd if(omp_opt) num_threads(num_t)
        for (size_t i = 0; i < x.size(); ++i) {
            y[i] = interp_(x[i]);
        }
        return y;
    }
private:
    auto interp_(Value xi) const -> Value {
        return gsl_spline_eval(interp, xi, nullptr);
    }
    T xp_;
    T yp_;
    gsl_spline *interp;
};
```

Шаблонный [15] тип T представляет собой тип стандартного контейнера [13] с поддержкой индексации (оператор «[]»), итерируемости и внутреннем «type-trait» [14] value\_type. В качестве T могут выступать, например, std::vector [13], std::array [14] или Eigen::ArrayX. Тип Value представляет собой обобщенный тип элементов контейнера. Для данного метатипа достаточно поддержки следующего концепта [16] is\_numeric:

```
template<class T>
concept is_numeric = std::is_integral_v<T> || std::is_floating_point_v<T>;
```

Конструктор [1] данного класса получает по значению два контейнера, после чего перемещает их в своё внутреннее состояние - поля `T xp_` и `T yp_` соответственно. Далее, в списке инициализации приватному полю `interp` типа `gsl_spline *` присваивается значение функции `gsl_spline_alloc`, что означает построения интерполяционного объекта с линейным методом интерполяции. После чего мы инициализируем и заполняем данными этот объект данным в теле конструктора с помощью функции `gsl_spline_init`, получая готовый интерполятор. Для данного класса из «rule of five» удалено всё, кроме деструктора во избежание неопределенного поведения после копирования или перемещения внутренних полей класса. В деструкторе вызывается функция `gsl_spline_free`, высвобождающая ресурсы переданного ей `gsl`-интерполятора. В приватном методе `interp_` вызывается функция `gsl_spline_eval` непосредственно вычисляющая интерполированное значение в указанной точке  $x_i$  для данного набора `xp` и `yp`. В перегруженном операторе «`()`» происходит создание результирующего набора точек «`u`» и заполнение его в цикле относительно входного набора точек «`x`».

Остановимся подробнее на цикле и директивах «`pragma`». Директива `#pragma omp parallel for simd` [5] – это директива препроцессора OpenMP (Open Multi-Processing), которая создает параллельную область выполнения, разбивая цикл на несколько одновременно выполняющихся во времени подциклов, что позволяет достичь существенного прироста в скорости исполнения алгоритма. Переменная `max_threads` это максимально количество потоков процессора (можно получить с помощью `omp_get_max_threads()` подключив заголовочный файл `<omp.h>` или воспользовавшись функцией стандартной библиотеки `std::thread::hardware_concurrency` [17] обе функции возвращают run-time значение). С помощью нее и условной части препроцессора `num_threads()` можно тонко настроить распараллеливание. В данном примере можно не опасаться гонки данных, т.к. запись идет в разные участки памяти независимо друг от друга. `simd` в данном случае обеспечивает параллелизм на уровне данных, т.е. процессор может выполнять несколько вычислений одновременно.

Шаблонный класс, реализующий кубическую интерполяцию строится аналогично, за исключение того, что вместо указателя `gsl_interp_linear` в функции `gsl_spline_alloc` будет использоваться `gsl_interp_cspline`. Алгоритмическая сложность [18] вычисления интерполяции в данной точке не превосходит  $O(n)$ , хотя, конечно, в кубическом случае на практике вычисления занимают большее время. Алгоритмическую сложность вычисления интерполяции множества точек можно оценить, как сложность вычисления в одной точке помноженную на количество точек интерполяции. Для случая квадратической интерполяции построим собственный алгоритм. Для этого нам потребуется ряд дополнительных ряд шаблонных функций и переменных. Два концепта определяют принадлежность данного типа к типу `std::vector` и `Eigen::ArrayX` соответственно

```
template<class Container>
concept is_vector = std::is_same_v<Container, std::vector<typename Container::value_type>>;
template<class Container>
concept is_eigen_array = std::is_same_v<Container, Eigen::ArrayX<typename Container::value_type>>;
```

Далее, положим

```
template<class T>
concept Floating = std::is_floating_point_v<T>;
template<Floating T = double>
constexpr auto nan = std::numeric_limits<T>::quiet_NaN();
constexpr int Precision = 8;
template<int Prec = 0, Floating T = double>
auto eps = (Prec == 0) ? (std::numeric_limits<T>::epsilon()) :
```

```
std::pow(10.0, Prec);
```

где `Precision` это количество значащих цифр после запятой у `floating` типа.

Напишем две обобщенные функции, которые будут делать реверс `std::vector` или `Eigen::ArrayX` соответственно, используя полиморфизм времени компиляции [1] на ранее определенных концептах

```
template<is_vector Container>
auto reverse(const Container &cont) {
    Container copy = cont;
    std::reverse(copy.begin(), copy.end());
    return copy;
}
template<is_eigen_array Container>
auto reverse(const Container &cont) {
    auto ref = cont.reverse();
    return ref;
}
```

Причем, функция для `Eigen::ArrayX` работает «на месте» [14], без внутренних копирований. Также определим ряд функций для корректного сравнения floating типов с учетом Precision

```
constexpr auto dbl_eq(double lhs, double rhs, double eps_ = eps<-Precision>) -> bool {
    return std::abs(lhs - rhs) < eps_;
}
constexpr auto dbl_less(double lhs, double rhs, double eps_ = eps<Precision>) -> bool {
    return rhs - lhs > eps_;
}
constexpr auto dbl_greater(double lhs, double rhs,
double eps_ = eps<-Precision>) -> bool {
    return lhs - rhs > eps_;
}
constexpr auto dbl_less_eq(double lhs, double rhs,
double eps_ = eps<-Precision>) -> bool {
    return std::abs(lhs - rhs) < eps_ || rhs - lhs > eps_;
}
constexpr auto dbl_greater_eq(double lhs, double rhs,
double eps_ = eps<-Precision>) -> bool {
    return std::abs(lhs - rhs) < eps_ || lhs - rhs > eps_;
}
```

Далее, определим функцию `upper_bound_with_guess`, которая работает как функция из стандартной библиотеки C++ `std::upper_bound` [13], т.е производит поиск в отсортированном массиве, но с улучшением скорости выполнения благодаря вычислению «предсказания» искомого элемента

```
template<class T, class V, class I>
auto upper_bound_with_guess(V key, const T &data, I guess) -> I {
    static I IN_CACHE = 8;
    auto size = data.size();
    I i_min = 0;
    I i_max = size;
    if (size <= 4) {
        auto it = std::upper_bound(data.begin(), data.end(), key);
        return it == data.end() ? data.size() - 1 : it - data.begin();
    }
    if (guess > size - 3) {
        guess = size - 3;
    }
    if (guess < 1) {
        guess = 1;
    }

    if (dbl_less(key, data[guess])) {
        if (dbl_less(key, data[guess - 1])) {
```

```

    i_max = guess - 1;
    if (guess > IN_CACHE && dbl_greater_eq(key, data[guess - IN_CACHE])) {
        i_min = guess - IN_CACHE;
    }
    } else {
        return guess - 1;
    }
} else {
    if (dbl_less(key, data[guess + 1])) {
        return guess;
    } else {
        if (dbl_less(key, data[guess + 2])) {
            return guess + 1;
        } else {
            i_min = guess + 2;
            if (guess < size - IN_CACHE - 1 &&
                dbl_less(key, data[guess + IN_CACHE])) {
                i_max = guess + IN_CACHE;
            }
        }
    }
}
}
}
}
while (i_min < i_max) {
    const I i_mid = i_min + ((i_max - i_min) >> 1);
    if (dbl_greater_eq(key, data[i_mid])) {
        i_min = i_mid + 1;
    } else {
        i_max = i_mid;
    }
}
return i_min - 1;
}
}

```

Тип T – это тип контейнера, V – тип значения, I – тип ключа. Данная функция хорошо себя ведет при поиске чисел из отсортированного набора чисел. Набор исходных чисел, очевидно, должен быть отсортирован, т.к. данная функция является усложненным вариантом бинарного поиска. Функция вычисления квадратичной интерполяции в точке будет основываться на интерполяционном многочлене Лагранжа второй степени [2]

$$L^2(x) = \sum_{i=1}^{n-1} P_i^2(x), \quad (1)$$

где

$$P_i^2(x) = a_i x^2 + b_i x + c_i \quad (2)$$

Для случая равноотстоящих узлов для набора точек  $(x_0, y_0), (x_1, y_1), (x_2, y_2)$  можно явно получить выражение полинома

$$P(x) = \frac{(x - x_1)(x - x_2)}{(x_0 - x_1)(x_0 - x_2)} y_0 + \frac{(x - x_0)(x - x_2)}{(x_1 - x_0)(x_1 - x_2)} y_1 + \frac{(x - x_0)(x - x_1)}{(x_2 - x_0)(x_2 - x_1)} y_2, \quad (3)$$

где  $x$  – текущая точка.

Разобьём саму функцию интерполяции на вспомогательную и основную.

Основная функция с использованием reverse будет иметь вид

```

template<class T, class R, class V>
auto quadratic(const T &x, const T &xp, const T &yp, bool bounds_error, std::optional<std::pair<V, V>>
fill_values,
bool extrapolate
) -> R {
    auto x_reversed = x.size() > 1 && x[1] < x[0];

```

```

auto xp_reversed = xp.size() > 1 && xp[1] < xp[0];
if (x_reversed && xp_reversed) {
    return reverse(quadratic_impl<R, V>(
        reverse(x),
        reverse(xp),
        reverse(yp),
        bounds_error,
        fill_values,
        extrapolate));
} else if (x_reversed) {
    return reverse(detail::quadratic_impl<R, V>(reverse(x), xp, yp, bounds_error, fill_values, extrapolate));
} else if (xp_reversed) {
    return detail::quadratic_impl<R, V>(x, reverse(xp), reverse(yp), bounds_error, fill_values, extrapolate);
} else {
    return detail::quadratic_impl<R, V>(x, xp, yp, bounds_error, fill_values, extrapolate);
}
}
}

```

Функция reverse дает возможность интерполяции набора точек, отсортированных по убыванию. Тогда реализация квадратичной интерполяции с использованием upper\_bound\_with\_guess и данных выше формул будет иметь следующий вид

```

template<class R, class V, class T1, class T2>
auto quadratic_impl(T1 x, T2 xp, T2 yp, bool bounds_error,
    std::optional<std::pair<V, V>> fill_values, bool extrapolate
) -> R {
    R r(x.size());
    auto nan = nan<V>;
    auto xp_sz = xp.size();
    auto yp_sz = yp.size();
    auto x_sz = x.size();
    auto k = 0;
    for (size_t i = 0; i < x_sz; ++i) {
        auto xi = x[i];
        if (dbl_less(xi, xp[0])) {
            if (extrapolate && xp_sz > 2) {
                double x1 = xp[0], x2 = xp[1], x3 = xp[2];
                double y1 = yp[0], y2 = yp[1], y3 = yp[2];
                r[i] = y1 + (xi - x1) * ((y1 - y2) / (x1 - x2)) +
                    (xi - x1) * (xi - x2) * ((y1 - 2 * y2 + y3) / ((x1 - x2) * (x1 - x3)));
            } else if (!bounds_error) {
                r[i] = fill_values ? fill_values->first : nan;
            } else {
                throw std::range_error("A value in x is below the interpolation range.");
            }
        } else if (dbl_greater(xi, xp[xp_sz - 1])) {
            if (extrapolate && xp_sz > 2) {
                double x1 = xp[xp_sz - 3], x2 = xp[xp_sz - 2], x3 = xp[xp_sz - 1];
                double y1 = yp[yp_sz - 3], y2 = yp[yp_sz - 2], y3 = yp[yp_sz - 1];
                r[i] = y3 + (xi - x3) * ((y3 - y2) / (x3 - x2)) +
                    (xi - x3) * (xi - x2) * ((y3 - 2 * y2 + y1) / ((x3 - x2) * (x3 - x1)));
            } else if (!bounds_error) {
                r[i] = fill_values ? fill_values->second : nan;
            } else {
                throw std::range_error("A value in x is above the interpolation range.");
            }
        } else {
            if (xp_sz == 1) {
                r[i] = yp[0];
            } else {
                k = upper_bound_with_guess(xi, xp, k);
            }
        }
    }
}

```

```

    k = k == 0 ? 1 : k;
    double x1 = xp[k - 1], x2 = xp[k], x3 = xp[k + 1];
    double y1 = yp[k - 1], y2 = yp[k], y3 = yp[k + 1];
    auto val1 = y1 / ((x1 - x2) * (x1 - x3));
    auto val2 = y2 / ((x2 - x1) * (x2 - x3));
    auto val3 = y3 / ((x3 - x1) * (x3 - x2));
    r[i] = (xi - x2) * (xi - x3) * val1 + (xi - x1) * (xi - x3) * val2 + (xi - x1) * (xi - x2) * val3;
}
}
}
return r;
}

```

Данная функция имеет дополнительную возможность экстраполяции при включенном флаге `extrapolate` и отключенном флаге `bounds_error`. При отключенной экстраполяции значения за пределами входного диапазона заполняются значениями из `fill_values`. Теперь построим сам интерполятор, используя функции и определения данные выше

```

template<class T, class R = T, class Value = typename T::value_type>
class quadratic_interpolator {
public:
    quadratic_interpolator(T xp, T yp, bool bounds_error = true,
std::optional<std::pair<Value, Value>> fill_values = std::nullopt,
bool extrapolate = false
) : xp_(std::move(xp)), yp_(std::move(yp)), bounds_error(bounds_error), fill_values(fill_values),
extrapolate(extrapolate) {
}
    quadratic_interpolator(const quadratic_interpolator &) = delete;
    quadratic_interpolator(quadratic_interpolator &&) noexcept = delete;
    T &operator=(const quadratic_interpolator &) = delete;
    T &operator=(quadratic_interpolator &&) noexcept = delete;
    auto operator()(const T &x) const -> T {
return quadratic(x, xp_, yp_, bounds_error, fill_values, extrapolate);
}
private:
    T xp_;
    T yp_;
    bool bounds_error;
    std::optional<std::pair<Value, Value>> fill_values;
    bool extrapolate;
};

```

Принцип построения и использования квадратичного интерполятора схож со случаями линейной и кубической интерполяции, за исключением использования функции `quadratic` в перегруженном операторе «`()`». Ограничения на типе контейнера и внутреннем типа элементов остаются прежними. На все приведенные выше интерполяторы накладываются следующие ограничения. Наборы входных данных `xp` и `yp` должны быть одного размера, набор `xp` должен быть строго возрастающим (или также строго убывающим в случае квадратической интерполяции). Данные для интерполяции – набор чисел `x` в линейном случае должен содержать по крайней мере 2 различные точки, в квадратическом случае – 3, в кубическом – 4.

Далее рассмотрим построение RBF-интерполятора. RBF (Radial Basis Functions) - это мощное и универсальное средство для построения интерполяций и аппроксимаций для нерегулярных наборов исходных данных. Радиально-базисная функция – это действительная функция  $\varphi$ , значение которой зависит только от расстояния от точки фиксированного центра. Более точно, пусть

$$\varphi: [0, \infty) \rightarrow \mathbb{R} \quad (4)$$

Тогда радиально-базисная функция  $\Phi_i: \mathbb{R}^d \rightarrow \mathbb{R}$  определяется так

$$\Phi_i(x) = \varphi(r_i) = \varphi(\|x - x_i\|) \quad (5)$$

где  $\{x_i\}_{i=1}^N \subset \mathbb{R}^d$  это множество различных  $N$  точек-центров, и норма  $\|\cdot\|$  – произвольная норма из  $\mathbb{R}^d$ . На практике, как и в нашей статье, целесообразно использовать Евклидову норму. Само название «радиально-базисная функция» основано на следующем ее свойстве. Значение  $\Phi$  в любой точке некоторой окрестности ее центра константно, т.е.

$$\|x_1\| = \|x_2\| \Rightarrow \Phi(x_1) = \Phi(x_2), \quad x_1, x_2 \in \mathbb{R}^d \quad (6)$$

Таким образом,  $\Phi$  радиально(сферически) симметрична относительно ее центра.

Приведем примеры классических радиально-базисных функций [19]

$$\varphi(r) = e^{-(\alpha r)^2} - \text{функция Гаусса}, \quad (7)$$

$$\varphi(r) = \frac{1}{1+(\alpha r)^2} - \text{обратно квадратичная функция}, \quad (8)$$

$$\varphi(r) = \frac{1}{\sqrt{1+(\alpha r)^2}} - \text{обратно мультиквадратичная функция}, \quad (9)$$

$$\varphi(r) = \sqrt{1+(\alpha r)^2} - \text{мультиквадратичная функция}, \quad (10)$$

где  $\alpha$  – фиксированный параметр и  $r$  – значение «радиуса».

Применим данные функции к построению интерполятора.

Пусть мы имеем неотсортированный набор точек  $\{x_i\}_1^N \in \mathbb{R}^1$ . Отметим, что этот подход применим и для  $\mathbb{R}^N$ , что представляет особый интерес для дальнейших исследований [19].

Тогда интерполируемое значение функции  $f$  в точке  $x$  можно вычислить по формуле

$$f(x) = \sum_{j=1}^N c_j \varphi(r_j) = \sum_{j=1}^N c_j \varphi(\|x - x_j\|), \quad (11)$$

где значение функции  $f(x)$  представлено в виде суммы  $N$  RBF функций, каждая из которых центрирована в различной точке  $x_j$  и помножена на соответствующий ей вес  $c_j$ .

Нетрудно заметить, что для решения интерполяционной задачи используется матрица расстояний и разложение по радиальному базису. Это приводит нас к решению системы линейных уравнений для данного набора точек

$$h_i = f(x) = \sum_{j=1}^N c_j \varphi(\|x - x_j\|) = \sum_{j=1}^N c_j \varphi_{i,j}, \quad i = 1, \dots, N \quad (12)$$

Эта система линейных уравнений представима в виде матричного выражения

$$Ac = h, \quad (13)$$

Где матрица  $A$  это симметричная матрица. Выражение можно развернуть следующим образом

$$\begin{pmatrix} \varphi_{1,1} & \cdots & \varphi_{1,i} & \cdots & \varphi_{1,N} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \varphi_{i,1} & \cdots & \varphi_{i,i} & \cdots & \varphi_{i,N} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \varphi_{N,1} & \cdots & \varphi_{N,i} & \cdots & \varphi_{N,N} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_1 \\ \vdots \\ c_i \\ \vdots \\ c_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_1 \\ \vdots \\ h_i \\ \vdots \\ h_N \end{pmatrix} \quad (14)$$

Данную систему линейных уравнений можно решить методом Гаусса [20], LU-разложения [21] и т.д. Таким образом, задача состоит в решении системы линейных уравнений для нахождения весов  $c_i$  для использования их в (12).

Перейдем к реализации RBF-интерполятора на C++. Норма [22] в  $\mathbb{R}^1$  вычисляется так

```
double dist(double a, double b) {
    return std::abs(a - b);
}
```

Тогда радиально базисные функции, указанные в (7), (8), (9), (10), можно записать так

```
double gauss(double x, double dx) {
    auto r = dist(x, dx);
    return std::exp(-std::pow(r, 2));
}
```

```
double multiquadric(double x, double dx) {
    auto r = dist(x, dx);
    return std::sqrt(1 + r * r);
}
```

```

}
double inverse_quadric(double x, double dx) {
    auto r = dist(x, dx);
    return 1.0 / (1 + r * r);
}
double inverse_multiquadric(double x, double dx) {
    auto r = dist(x, dx);
    return 1.0 / std::sqrt(1 + r * r);
}

```

В данной реализации  $\alpha$  для простоты взят за 1.

Решение системы (14) для относительно большого набора входных точек является нетривиальной задачей, поэтому разумно воспользоваться готовым «решателем» системы линейных уравнений методом LU-декомпозиции из библиотеки Eigen. И по этой причине массивы данных для этой задачи будут представлены в виде массивов из Eigen, а именно Eigen::ArrayX и Eigen::VectorX. Для представления типа матрицы также воспользуемся встроенным типом Eigen::MatrixX. Код программы не трудно переделать так, чтобы входные данные представлялись в виде std::vector, выполнив преобразования к массивам из Eigen. Реализация интерполятора выглядит следующим образом

```

template<class T, class Value = T::value_type>
class rbf_interpolator {
public:
    rbf_interpolator(T &xp, T &yp, std::function<double(double, double)> rf) : xp_(xp), rf_(rf) {
        auto n = xp_.size();
        Eigen::MatrixX<Value> phi_m(n, n);
#pragma omp parallel for simd collapse(2)
        for (size_t i = 0; i < n; ++i) {
            for (size_t j = i; j < n; ++j) {
                auto val = rf_(xp_[i], xp_[j]);
                phi_m(i, j) = val;
                phi_m(j, i) = val;
            }
        }
        // no copy
        Eigen::Map<Eigen::MatrixX<Value>> yp_m(yp.data(), yp.size(), 1);
        weights = phi_m.partialPivLu().solve(yp_m);
    }
    auto operator()(const T &x) const {
        T y(x.size());
#pragma omp parallel for
        for (size_t i = 0; i < x.size(); ++i) {
            Value val = 0.0;
            for (size_t j = 0; j < weights.size(); ++j) {
                val += weights[j] * rf_(x[i], xp_[j]);
            }
            y[i] = val;
        }
        return y;
    }
private:
    T xp_;
    std::function<double(double, double)> rf_;
    Eigen::VectorX<Value> weights;
};

```

Конструктор данного класса принимает на вход наборы входных данных xp, yp и функтор rf, который является RBF-функцией. Далее в конструкторе происходит заполнение матрицы phi\_m значений RBF-функции в входных точках. Тут применены две оптимизации: «#pragma omp parallel for simd collapse (2)» это специальная директива препроцессора

OpenMP, распараллеливающая вложенные циклы глубины 2 и учтена симметричность матрицы, поэтому внутренний цикл стартует сразу с «i» и заполняются симметричные позиции в матрице. Далее без копии создается объект матрицы `ur_m` из входного массива `ur`, для использования в решении СЛАУ. Метод `solve()` решает данную СЛАУ методом LU-декомпозиции, что является наиболее высоконагруженной частью алгоритма. Выбор такого способа неслучаен, т.к. только он имеет внутреннее распараллеливание среди прочих «решателей» из Eigen, что является очень существенным фактором, сказывающимся на времени работы программы.

Перегруженный оператор «`()`» принимает массив точек `x`, в которых нужно выполнить интерполяцию. Тут происходит дословное воспроизведение формулы [NUMBER] с применением распараллеливания только внешнего цикла, во избежание гонки данных. Использование распараллеливания вложенного цикла с использованием атомарных переменных или критических секций даст лишь падение производительности. На RBF интерполятор накладываются следующие ограничения. Наборы входных данных `xr` и `ur` должны быть одного размера. Требования упорядоченности наборов нет. Данный интерполятор сильно уступает в скорости приведенным ранее интерполяторам, но имеет преимущество в способности обрабатывать нерегулярные наборы входных данных, что особенно важно и полезно в двумерном или трехмерном случаях.

**Обсуждение результатов.** Проведем замеры производительности реализованных интерполяторов, сравним их с аналогами из SciPy и построим графики получившихся функций. Компиляция и запуск программ производилась в системе Ubuntu 23.04, с версией ядра 6.2, процессор Intel Core i5-12600K, компилятор GCC 13.1. Стандарт языка – C++-20. При компиляции указан флаг `-fopenmp` для включения OpenMP под GCC и флаг `-lgsl` для подключения статической библиотеки GSL. Желательно добавить флаг `-march=native` для максимальных оптимизаций под конкретную архитектуру процессора.

Тестовой функцией для проверки производительности являлась функция  $f(x) = x \sin(x)$  на отрезке  $[-100, 100]$  с шагом 0.02. Итого,  $N = 10000$ , где  $N$  – количество точек. С указанным шагом заполнялись значения исходных массивов `xr` и `ur`. Далее в массив `x` размера  $M = 20000$  записывались случайные числа, созданные с помощью генератора случайных чисел Мерсенна [23] из данного отрезка.

По полученному массиву `x` производилась интерполяция. Массивы и случайные числа в тестах на Python строились с помощью библиотеки NumPy [24]. Получены следующие результаты (табл.1). Как видно из табл.1, наилучший результат достигается при включенных оптимизациях OpenMP и SIMD.

**Таблица 1. Сравнение времени выполнения интерполяторов**  
**Table 1. Comparison of execution time of interpolators**

	OpenMP + SIMD	OpenMP	Без OpenMP и SIMD	SciPy, interp1d
Linear, N = 10000, M = 20000	0.000545884 sec	0.000579729 sec	0.00142267 sec	0.002537 sec
Quadratic, N = 10000, M = 20000	-	-	0.00179693 sec	0.035637 sec
Cubic, N = 10000, M = 20000	0.000851297 sec	0.000861991 sec	0.00197976 sec	0.037861 sec
RBF, N = 10000, M = 20000	4.24728 sec	11.2738 sec	37.0253 sec	-

Эти результаты превосходят данные, полученные из SciPy в **4.6**, **19** и **44** раза в случаях линейной, квадратической и кубической интерполяциях соответственно. В случае RBF интерполяции виден существенный прирост скорости при использовании OpenMP и SIMD – в **8.8** раз. Тем не менее, этот тип интерполяции остается довольно медленным по сравнению с тремя первыми. В SciPy RBF интерполяции в одномерном случае нет.

Для наглядности приведем графики (рис.1-5) полученных интерполированных значений в сравнении с оригинальным графиком  $f(x) = x\sin(x)$ , но уже на отрезке  $[-10, 10]$ . Построения производились в той же системе с помощью утилиты gnuplot

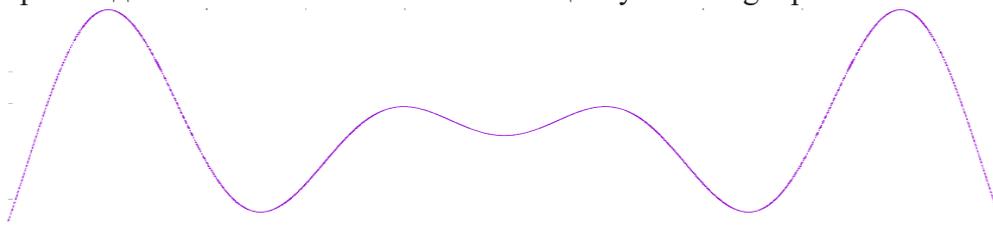


Рис. 1. Исходные точки  
Fig. 1. Original points

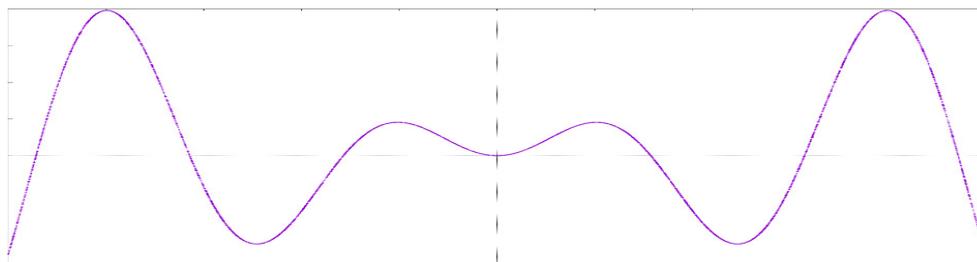


Рис. 2. Результат линейной интерполяции  
Fig. 2. Result of linear interpolation

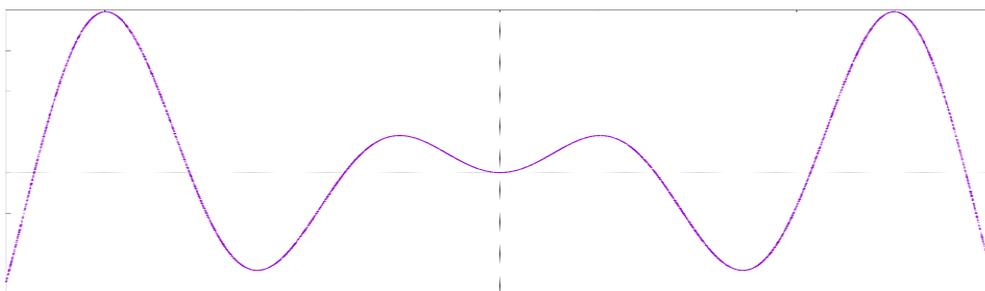


Рис 3. Результат квадратической интерполяции  
Fig. 3. Result of quadratic interpolation

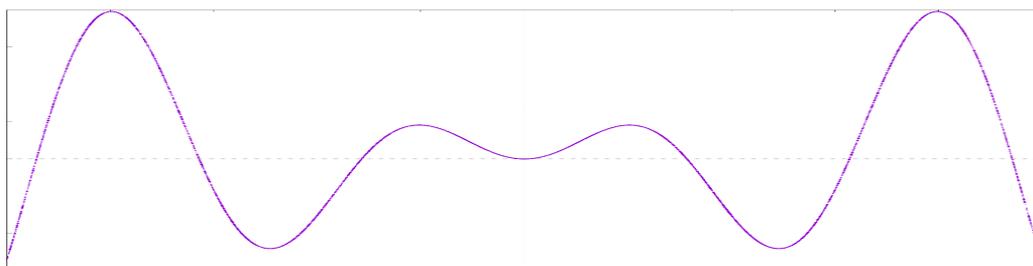


Рис. 4. Результат кубической интерполяции  
Fig. 4. Result of cubic interpolation

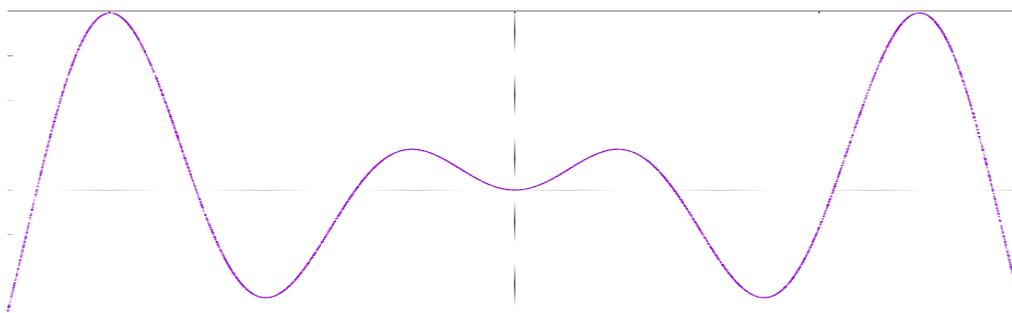


Рис. 5. Результат RBF-интерполяции  
Fig. 5. Result of RBF-interpolation

**Вывод.** В статье мы рассмотрели различные виды одномерных интерполяторов, такие как линейные, квадратические, кубические, а также радиально-базисные функции (RBF), построение интерполяторов с их помощью, их реализацию на языке программирования C++ актуального стандарта C++-20 с использованием библиотек GSL и Eigen, а также применили ряд дополнительных оптимизаций с использованием OpenMP и SIMD. В результате, исследование приводит нас к следующим ключевым выводам:

1. Интерполяторы на C++ с использованием GSL и Eigen оказались более эффективными и быстрыми по сравнению с аналогичными готовыми интерполяторами из SciPy. В наших тестах мы использовали относительно скромные размеры входных данных. Если, к примеру, увеличить  $N$  до 500000 и  $M$  до 1000000, то время работы нашего кубического интерполятора будет равно 0.04741 с., в то время как время работы кубического интерполятора из SciPy будет равно 52.8163 с., что в **1114** медленнее. Это колоссальная разница.
2. Реализация интерполяторов, использующих разные методы интерполяции, позволяет выбирать наилучший метод в зависимости от конкретной задачи.
3. Применение технологии OpenMP и SIMD позволяет эффективно распараллеливать интерполяцию данных, ускоряя ее выполнение.

**Библиографический список:**

1. Stroustrup B. The C++ Programming Language, 4<sup>th</sup> Edition. Addison-Wesley. - 2013 – 1361 с.
2. Половко А.М., Бутусов П.Н. Интерполяция. Методы и компьютерные технологии их реализации. - СПб.: БХВ-Петербург, 2004 – 314 с.
3. Hardy R.L. Multiquadric equations of topography and other irregular surfaces. Journal of Geophysical Research. 76 (8): pp 1905–1915.
4. Galassi. M. GNU Scientific Library: Reference Manual, 3<sup>rd</sup> Edition. - Network Theory, 2009 – 573 с.
5. Антонов А.С. Параллельное программирование с использованием технологии OpenMP. — Москва: МГУ, 2009. — 728 с.
6. Нуньес-Иглесиас Х., Волт Ш., Дэншоу Х. Элегантный SciPy. - М.: ДМК Пресс, 2018. - 266с.
7. Документация библиотеки Eigen [дата обращения 29.08.2023]. Доступ по ссылке: <https://eigen.tuxfamily.org>
8. Paul C., Kenneth R. SIMD Programming Manual for Linux and Windows. - Springer, 2004 - 351с.
9. Лутц М. Изучаем Python, - Вильямс, 2019 - 832с.
10. Соснин В., Балакшин П., Шилко Д., Пушкарев, Д., Мишенёв А., Кустарев П., Тропченко А. Введение в параллельные вычисления. - Санкт-Петербург, ИТМО, 2023 - 130с.
11. Ермолицкий А.В., Нейман-заде М.И. Методы повышения эффективности автоматической векторизации вычислений. Доклады пятой международной конференции «Параллельные вычисления и задачи управления». - Москва. 2010 - с. 957-972.
12. Калачев А. Многоядерные процессоры. Учебное пособие. - Просвещение, 2014 - 247с.
13. Джосаттис Н. Стандартная библиотека C++, 2-е изд. : Пер с англ. – М. :ООО “И.Д. Вильямс”, 2014. – 1136 с.
14. Мейерс С. Эффективный и современный C++. Пер. С англ. М. : ООО “И.Д. Вильямс”, 2016. – 304 с.
15. Vandevoorde D., Josuttis N, Gregor D. C++ Templates. The Complete Guide, 2<sup>nd</sup> Edition. Addison-Wesley, 2018. – 849 с.
16. Josuttis N. C++20 – The Complete Guide. The LeanPub, 2022 – 762 с.
17. Уильямс Э. C++. Практика многопоточного программирования. – СПб.: Питер, 2020. – 640 с.
18. Пышкин Е.В. Структуры данных и алгоритмы: реализация на C++. СПб.:ФТК СПбГПУ, 2009. 200 с.
19. Majdisova Z. Interpolation and Approximation Methods for Large Geometric Datasets. - University of West Bohemia, 2016 – pp 18 – 24.
20. Авхадиев Ф.Г. Численные методы алгебры и анализа. Учебное пособие. Казань: Издательство Казанского университета, 2019. – 200 с.
21. Банников А.С., Ким И.Г., Латыпова Н.В. Численные методы. Учебное пособие. Ч 1. – 2-е изд., испр. и доп. – Ижевск: Издательский центр «Удмуртский университет», 2018. – 80 с.
22. Колмогоров А.Н., Фомин С.В. Элементы теории функций и функционального анализа. Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», М., 1975. – 575 с.
23. Gentle J.E. «Random Number Generation and Monte Carlo Methods», 2<sup>nd</sup> Edition. Springer, 2003. 399 p.
24. Документация библиотеки NumPy [дата обращения 1.09.2023]. Доступ по ссылке: <https://numpy.org/doc/stable/>
25. Zhang N., Canini K., Silva S., Gupta M. Fast Linear Interpolation. ACM Journal on Emerging Technologies in Computer Systems, Volume 17, Article No.: 20, 2021, pp 1-15 .
26. Li C., Zhao R. Implementation of RBF Mesh Deformation with Topology Refinement in OpenFOAM. Proceedings of the 2020 4<sup>th</sup> International Conference on High Performance Compilation, Computing and Communications. 2020, pp 79-93.

## References

1. Stroustrup B. The C++ Programming Language, 4<sup>th</sup> Edition. Addison-Wesley. 2013; 1361.
2. Polovko A.M., Butusov P.N. Interpolation. Methods and computer technologies for their implementation. - St. Petersburg: BHV-Petersburg, 2004;314. (In Russ)
3. Hardy R.L. Multiquadric equations of topography and other irregular surfaces. Journal of Geophysical Research. 76 (8): 1905–1915.
4. Galassi M. GNU Scientific Library: Reference Manual, 3<sup>rd</sup> Edition. Network Theory, 2009; 573.
5. Antonov A.S. Parallel programming using OpenMP technology . Moscow: MSU, 2009; 728. (In Russ)
6. Nunez-Iglesias J., Walt C., Danshaw H. Elegant SciPy. - M.: DMK Press, 2018; 266. (In Russ)
7. Eigen C++ Library Documentation [accessed 29.08.2023]. URL: <https://eigen.tuxfamily.org>
8. Paul C., Kenneth R. SIMD Programming Manual for Linux and Windows. Springer, 2004; 351.
9. Lutz M. Learning Python - Williams, 2019; 832. (In Russ)
10. Sosnin V., Balakshin P., Shilko D., Pushkarev D., Mishenyov A., Kustarev P., Tropchenko A. Introduction to parallel computing. St. Petersburg, ITMO, 2023; 130. (In Russ)
11. Ermolitsky A.V., Neumann-zade M.I. Methods for increasing the efficiency of automatic vectorization of calculations. Reports of the fifth international conference "Parallel Computing and Control Problems". - Moscow. 2010; 957-972. (In Russ)
12. Kalachev A. Multi-core processors. Tutorial. - Enlightenment, 2014;247. (In Russ)
13. Josuttis N. C++ Standard Library, 2nd Ed. M. :OOO "I.D. Williams", 2014; 1136. (In Russ)
14. Meyers S. Efficient and modern C++ – M. : OOO I.D. Williams", 2016; 304. (In Russ)
15. Vandevoorde D., Josuttis N, Gregor D. C++ Templates. The Complete Guide, 2<sup>nd</sup> Edition. Addison-Wesley, 2018; 849.
16. Josuttis N. C++20 – The Complete Guide. The LeanPub, 2022; 762.
17. Williams E. C++. The practice of multithreaded programming. St. Petersburg: Peter, 2020; 640. (In Russ)
18. Pyshkin E.V. Data Structures and Algorithms: Implementation in C++. St. Petersburg: FTK SPbGPU, 2009; 200. (In Russ)
19. Majdisova Z. Interpolation and Approximation Methods for Large Geometric Datasets. University of West Bohemia, 2016;18 – 24.
20. Avkhadiev F.G. Numerical methods of algebra and analysis. Tutorial. Kazan: Kazan University Press, 2019; 200. (In Rus)
21. Bannikov A.S., Kim I.G., Latypova N.V. Numerical methods. Tutorial. Ch 1. - 2nd ed., Rev. and additional - Izhevsk: Publishing Center "Udmurt University", 2018; 80. (In Russ)
22. Kolmogorov A.N., Fomin S.V. Elements of the theory of functions and functional analysis. The main edition of the physical and mathematical literature of the publishing house "Nauka", M., 1975; 575. (In Russ)
23. Gentle J.E. «Random Number Generation and Monte Carlo Methods», 2<sup>nd</sup> Edition. Springer, 2003; 399.
24. NumPy Documentation [accessed 1.09.2023]. URL: <https://numpy.org/doc/stable/>
25. Zhang N., Canini K., Silva S., Gupta M. Fast Linear Interpolation. ACM Journal on Emerging Technologies in Computer Systems, Volume 17, Article No.: 20, 2021;1-15 .
26. Li C., Zhao R. Implementation of RBF Mesh Deformation with Topology Refinement in OpenFOAM. Proceedings of the 2020 4<sup>th</sup> International Conference on High Performance Compilation, Computing and Communications. 2020; 79-93.

### Сведения об авторах:

Абилова Фариды Владимировны, кандидат физико-математических наук, доцент, заведующая кафедрой высшей математики; [kvm@dstu.ru](mailto:kvm@dstu.ru)

Абилов Марат Владимирович, кандидат физико-математических наук, старший преподаватель кафедры высшей математики; [abilov.marat70@mail.ru](mailto:abilov.marat70@mail.ru)

Селимханов Эмирхан Валерьевич, ведущий специалист отдела разработки геологических проектов Управления развития информационных технологий; [postpost42@yandex.ru](mailto:postpost42@yandex.ru)

### Information about authors:

Farida V. Abilova, Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Assoc. Prof., Department of Higher Mathematics; [kvm@dstu.ru](mailto:kvm@dstu.ru)

Marat V. Abilov, Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Senior Lecturer, Department of Higher Mathematics; [abilov.marat70@mail.ru](mailto:abilov.marat70@mail.ru)

Emirkhan V. Selimkhanov, Leading Specialist of the Geological Projects Development Department of the Information Technology Development Department; [postpost42@yandex.ru](mailto:postpost42@yandex.ru)

### Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 26.09.2023.

Одобрена после рецензирования/ Revised 12.10.2023.

Принята в печать/Accepted for publication 12.10.2023.

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ**  
**INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS**

УДК 004. 056

DOI: 10.21822/2073-6185-2023-50-4-51-58



Оригинальная статья/Original article

**Метод оптимизации инвестиционного пакета на основе  
портфельной теории Марковица**

**А.Д. Байдалин**

Сибирский государственный индустриальный университет,  
654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42, Россия

**Резюме. Цель.** Целью исследования является реализация и оценка метода оптимизации на основе портфельной теории Марковица. **Метод.** Модель построена средствами языка программирования Python и необходимыми библиотеками. Также для решения поставленной задачи использовались принципы финансовой теории – расчет риска покупаемого актива, диверсификация портфеля и принцип оптимальности. Эти принципы составляют основу финансовой теории и помогают принимать обоснованные решения, связанные с инвестициями, финансированием и управлением рисками. **Результат.** Составлена модель программы, которая на вход принимает исторические данные по изменению стоимости акций разных компаний. После этого происходит расчет оптимального портфеля и выводится в терминал пользователя-инвестора. Портфельная теория Марковица помогает определить оптимальный портфель, который обеспечивает максимальную доходность при заданном уровне риска или минимальный риск при заданной доходности. Оптимальный портфель находится на касательной к кривой безрисковых активов и является наилучшим выбором для инвестора с учетом его предпочтений. **Вывод.** Разработанная Гарри Марковицем методика формирования инвестиционного портфеля, направленная на оптимальный выбор активов, исходит из требуемого соотношения доходность/риск. Сформулированные им идеи составляют основу современной портфельной теории. Портфельная теория Марковица определяет эффективное множество, которое представляет собой все возможные портфели с различными сочетаниями активов, обеспечивающими одинаковый уровень риска. Инвесторы могут выбирать портфели из этого множества в зависимости от своих личных целей и ограничений. Разнообразие активов в портфеле помогает снизить общий уровень риска и улучшить соотношение доходности и риска.

**Ключевые слова:** инвестиции, оптимизация, портфельная теория, математическая модель, машинное обучение и искусственный интеллект, диверсификация, акции, облигации, фондовый рынок, доходность инвестиций, рыночный анализ, алгоритмы, анализ данных

**Для цитирования:** А.Д. Байдалин. Метод оптимизации инвестиционного пакета на основе портфельной теории Марковица. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023; 50(4):51-58. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-4-51-58

**Optimization method of investment package based on Markowitz portfolio theory**

**A.D. Baydalın**

Siberian State Industrial University,  
42 Kirova St., Novokuznetsk 654007, Russia

**Abstract. Objective.** The aim of the study is to implement and evaluate the optimization method based on the Markowitz portfolio theory. **Method.** The model is built using the Python programming language and the necessary libraries. Also, to solve the problem, the principles of financial theory were used - the calculation of the risk of the purchased asset, portfolio

diversification and the principle of optimality. These principles form the basis of financial theory and help you make informed decisions related to investment, financing, and risk management. **Result.** A model of the program has been compiled, which accepts historical data on changes in the value of shares of different companies as input. After that, the optimal portfolio is calculated and displayed in the terminal of the user-investor. Markowitz portfolio theory helps to determine the optimal portfolio that provides the maximum return for a given level of risk or the minimum risk for a given return. The optimal portfolio is tangent to the risk-free asset curve and is the best choice for the investor, given his preferences. **Conclusion.** The method of forming an investment portfolio developed by Harry Markowitz, aimed at the optimal choice of assets, proceeds from the required ratio of profitability/risk. The ideas formulated by him form the basis of modern portfolio theory. Portfolio theory Markowitz defines an efficient set, which is all possible portfolios with different combinations of assets that provide the same level of risk. Investors can choose portfolios from this set depending on their personal goals and limitations. The variety of assets in a portfolio helps reduce the overall level of risk and improve the risk-reward ratio.

**Keywords:** investment, optimization, portfolio theory, mathematical model, machine learning and artificial intelligence, diversification, stocks, bonds, stock market, investment return, market analysis, algorithms, data analysis

**For citation:** A.D. Baydalın. Investment package optimization method based on the Markowitz portfolio theory. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2023; 50(4):51-58. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-4-51-58

**Введение.** Алгоритмическая торговля, также известная как автоматизированная торговля или торговля с использованием роботов (трейдинг-роботов), представляет собой стратегию торговли на финансовых рынках, при которой решения о совершении сделок принимаются автоматически на основе заданных компьютерных алгоритмов. Алгоритмическая торговля стала широко распространенной с развитием технологий и компьютерных систем. Она позволяет торговым фирмам и инвесторам реагировать на изменения рынка намного быстрее, чем при традиционной «ручной» торговле, и может быть особенно полезной при обработке больших объемов данных и выполнении сложных стратегий. Однако, как и любая торговая деятельность, алгоритмическая торговля сопряжена с рисками, и неправильно настроенные алгоритмы могут привести к финансовым потерям [1-3].

Такие алгоритмы могут быть разработаны для выполнения различных стратегий, которые охватывают широкий спектр параметров и условий рынка. Некоторые из наиболее распространенных стратегий в алгоритмической торговле включают:

1. Арбитраж: Эксплуатация временных или ценовых различий между различными рынками, инструментами или биржами.
2. Маркет-мейкерство: Постоянное размещение ордеров на покупку и продажу для обеспечения ликвидности на рынке.
3. Трендовая торговля: Основана на выявлении и эксплуатации длительных тенденций и движений цен на рынке.
4. Статистические стратегии: Используют статистические модели и анализ данных для принятия торговых решений.
5. Анализ биржевых стаканов: Используется информация о текущих ордерах на покупку и продажу для выявления потенциальных движений цен.
6. Арбитраж на основе рисков: Эксплуатация различий в волатильности и корреляции между различными активами.
7. Торговля на новостях: Реакция на важные новости и события, влияющие на рынки [4-5].

**Постановка задачи.** Целью данной работы является разработка и интеграция в терминал инвестора метода оптимизации портфеля на основе теории, которую предложил Гарри Марковиц. Финансовая отрасль считается одной из наиболее динамичных и подверженных

инновациям отраслей в мире. Она всегда стремится использовать новые технологии и подходы для повышения эффективности, снижения затрат и улучшения клиентского опыта. Некоторые из технологий, которые имеют потенциал повлиять на финансовую отрасль [6-8]. Еще одним фактором стала всевозрастающая роль искусственного интеллекта в финансовых расчетах. Все больше финансовых учреждений применяет методы машинного и глубокого обучения в операционной деятельности и в системах принятия инвестиционных решений.

Рынок ценных бумаг — это место, где покупатели и продавцы встречаются для торговли финансовыми инструментами, такими как акции, облигации, валюты, фьючерсы и другие ценные бумаги. Это физическое или виртуальное пространство, где происходят операции купли-продажи этих активов. Важной характеристикой рынка ценных бумаг является его роль в обеспечении доступа к капиталу компаниям, государствам и другим эмитентам, которые нуждаются в финансировании своей деятельности. Через выпуск акций и облигаций они привлекают инвесторов и капитал для развития и расширения своих бизнесов или для покрытия долговых обязательств. [9-10]

Основные типы рынков ценных бумаг:

1. Рынок акций: Торговля акциями компаний, представляющими долю в собственности компании. Эти акции обычно обозначают долю в капитале компании и дают право на получение дивидендов и голосование на общем собрании акционеров.
2. Рынок облигаций: Облигации представляют собой долговые ценные бумаги, которые эмитент обещает вернуть с определенным процентом (купоном) инвесторам после определенного срока.
3. Рынок валют (Форекс): Торговля валютами различных стран. Участники рынка могут покупать и продавать различные валюты с целью прибыли от изменения их курсов. [11-13]
4. Рынок фьючерсов и опционов: Торговля фьючерсами и опционами, которые представляют собой договоры на покупку или продажу определенных активов по заранее определенным условиям в будущем.
5. Рынок сырьевых товаров: Торговля сырьевыми товарами, такими как нефть, золото, серебро, зерно и др.

На рынке ценных бумаг цены формируются на основе спроса и предложения, а торговые операции могут быть выполнены как на бирже, так и во внебиржевом (ОТС) режиме. Рынок ценных бумаг является важной частью финансовой системы и оказывает значительное влияние на экономику в целом.

Финансовый посредник – профессиональная организация, которая выступает в качестве связующего звена между биржей и физическим лицом. Она позволяет потенциальным инвесторам попасть на рынок ценных бумаг. В качестве финансового посредника могут выступать следующие лица — это брокеры, дилеры, доверительные управляющие, инвестиционные советники, регистраторы и депозитарии. По данным декабря 2019 года на российском рынке ценных бумаг действует 482 организации, из них 46% — кредитные организации, 54% — не кредитные финансовые организации.

Брокер - это лицо или компания, которая действует как посредник между инвесторами и рынками ценных бумаг. Его основная задача состоит в том, чтобы обеспечить возможность покупки и продажи ценных бумаг на финансовых рынках от имени своих клиентов. Брокеры выполняют роль исполнителей заявок на покупку и продажу ценных бумаг. Они предоставляют доступ к различным рынкам и биржам, где торгуются акции, облигации, валюты, фьючерсы и другие инструменты. Брокеры помогают инвесторам находить оптимальные цены для сделок и выполнять заказы согласно указанным параметрам [14]. Брокеры могут быть представителями крупных финансовых институтов, таких как банки или инвестиционные компании, или быть независимыми агентами. Они могут предоставлять услуги как частным инвесторам, так и институциональным клиентам.

Каждый брокер обязан работать в соответствии с законодательством и правилами регулирующих организаций финансовых рынков. На рис. 1 представлена структура рынка из описания Банка России:

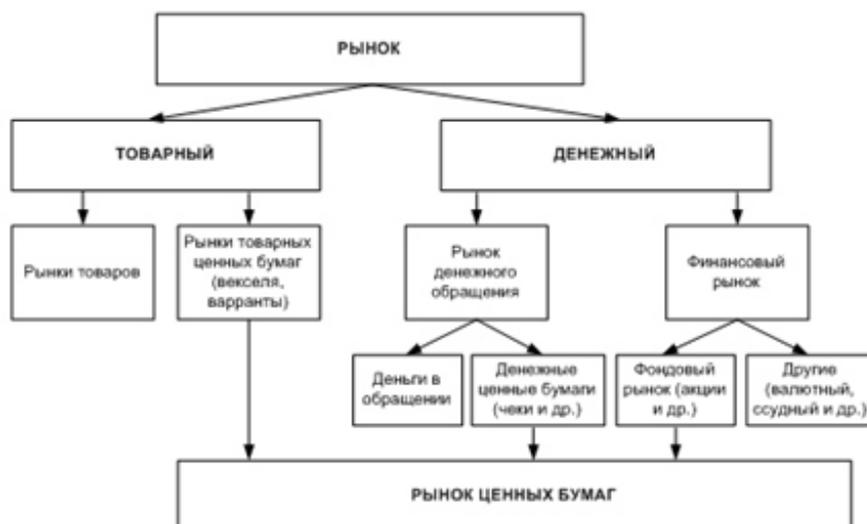


Рис. 1. Схема устройства

Fig. 1. Device diagram

Биржа определяет принципы проведения торгов на фондовой бирже, а также устанавливает временные ограничения.

**Методы исследования.** Портфельная теория – это концептуальная модель, разработанная в экономической и финансовой науке, которая изучает оптимальное распределение активов в инвестиционном портфеле с целью достижения наилучшего баланса между ожидаемой доходностью и риском.

Теория была предложена Гарри Марковицем в 1952 году и является основополагающим принципом в области управления портфелем.

Основная идея заключается в том, что инвесторы могут минимизировать риск, связанный с инвестициями, и максимизировать ожидаемую доходность, эффективно комбинируя различные финансовые активы в своем портфеле. [15-16]

Ключевые концепции портфельной теории включают в себя:

1. Риск и доходность: Инвесторы оценивают ожидаемую доходность и риск каждого актива в портфеле. Высокодоходные активы обычно сопровождаются более высоким риском, а низкодоходные активы – меньшим риском.
2. Корреляция: Корреляция между различными активами в портфеле играет важную роль. Диверсификация путем включения некоррелирующих или слабо коррелирующих активов может снизить общий риск портфеля.
3. Эффективный фронт: Портфель, который представляет наилучший баланс между ожидаемой доходностью и риском, называется «эффективным фронтом». Это графическое представление оптимальных портфелей для различных уровней риска.
4. Оптимизация портфеля: Портфельная теория предлагает математический подход для определения оптимального распределения активов в портфеле на основе предпочтений инвестора, его уровня терпимости к риску и желаемой доходности.
5. CAPM: Капиталовознаграждение, или CAPM (Capital Asset Pricing Model), является дополнительной моделью, основанной на портфельной теории, которая используется для определения стоимости капитала и цены акций. [17]

Портфельная теория имеет широкое применение в инвестиционном управлении, финансовом анализе и активном управлении портфелями.

Она помогает инвесторам принимать информированные решения о том, как достичь желаемых инвестиционных целей, учитывая свой индивидуальный уровень риска и предпочтений.

Для построения пространства возможных портфелей Марковиц предложил использовать класс активов, вектор их средних ожидаемых доходностей и матрицу ковариаций. На рис. 2 представлена кривая риск/доходностей в модели Марковица.

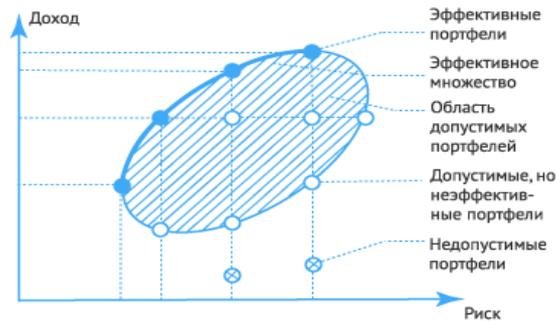


Рис. 2. Кривая риск/доходность в модели Марковица

Fig. 2. Risk/return curve in the Markowitz model

**Обсуждение результатов.** Задача оптимизации портфеля активов с вектором средней доходности  $r$  ковариационной матрицей  $V$  может быть сформулирована следующим образом:

$$\begin{cases} \sigma_p^2 = d^T V d \rightarrow \min \\ d^T r = r_p \\ d^T e = 1 \end{cases}$$

К этим условиям в задаче оптимизации портфеля активов следует добавить условие положительности портфеля (долей). Однако, в общем случае финансовых инструментов предполагается возможность открытия коротких позиций (отрицательных долей инструментов в портфеле). Тогда можно найти общее аналитическое решение задачи.

$$A = \begin{pmatrix} r^T \\ e^T \end{pmatrix} V^{-1} \begin{pmatrix} r \\ e \end{pmatrix}$$

Если обозначить  $A$ , тогда зависимость дисперсии оптимизированного (эффективного) портфеля от требуемой доходности будет иметь вид

$$\sigma_p^2 = (r_p, 1) A^{-1} \begin{pmatrix} r_p \\ 1 \end{pmatrix}$$

где  $\sigma_p^2$  – минимально возможная дисперсия доходности портфеля и соответствующая ему средняя доходность;

$r_1$  – доходность портфеля, с соотношением риск-доходность таким же, как и портфель минимального риска (графически это единственная точка пересечения с параболой прямой, проходящей через начало координат и вершину параболы).

Для начала работы важно импортировать необходимые библиотеки. На рис.2 представлена часть кода с импортом библиотек.

```
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
import pandas as pd
import pandas_datareader as web
from matplotlib.ticker import FuncFormatter

from pypfopt.efficient_frontier import EfficientFrontier
from pypfopt.discrete_allocation import get_latest_prices, DiscreteAllocation
from pypfopt import risk_models
from pypfopt import expected_returns
from pypfopt.cla import CLA
import pypfopt.plotting as pplt
from matplotlib.ticker import FuncFormatter
```

Рис. 3. Импорт библиотек Python

Fig. 3. Import Python libraries

Следующим этапом с помощью библиотеки yahoo finance происходит выгрузка по стоимости закрытия акций некоторых компаний. В данном случае для примера будем использовать информацию о следующих компаниях – Apple, Amazon, Bank of America, Ford, Google, Intel, Nvidia и Tesla. На рис. 4 представлен код по загрузке исторических данных.

```
import yfinance as yf
tickers = ['TSLA', 'GOOGL', 'F', 'AAPL', 'AMZN', 'NVDA', 'BAC', 'INTC']
df_stocks = yf.download(tickers, start='2018-01-01', end='2023-03-01')['Adj Close']

df_stocks.tail()
```

	AAPL	AMZN	BAC	F	GOOGL	INTC	NVDA	TSLA
Date								
2023-02-22	148.910004	95.790001	34.069035	12.21	91.650002	25.469999	207.539993	200.860001
2023-02-23	149.399994	95.820000	34.039227	12.07	90.889999	25.610001	236.639999	202.070007
2023-02-24	146.710007	93.500000	33.989548	11.88	89.129997	25.139999	232.860001	196.880005
2023-02-27	147.919998	93.760002	33.989548	12.06	89.870003	24.900000	235.009995	207.630005
2023-02-28	147.410004	94.230003	34.078968	12.07	90.059998	24.930000	232.160004	205.710007

Рис. 4. Скачивание данных

Fig. 4. Download data

Перейдем к расчетам по оптимизации портфеля и начнем с определения ожидаемой доходности и дисперсии портфеля. Далее сохраним значения весов портфеля с максимальным коэффициентом Шарпа и минимальной дисперсией.

На рис. 5 происходит вывод основных характеристик портфеля для дальнейшей оптимизации.

```
#Годовая доходность
mu = expected_returns.mean_historical_return(df_stocks)
#Дисперсия портфеля
Sigma = risk_models.sample_cov(df_stocks)
#Максимальный коэффициент Шарпа
ef = EfficientFrontier(mu, Sigma, weight_bounds=(0,1))
sharpe_pfolio=ef.max_sharpe()
print(sharpe_pwt)

OrderedDict([('AAPL', 0.63367), ('AMZN', 0.0), ('BAC', 0.0), ('F', 0.0), ('GOOGL', 0.0), ('INTC', 0.0), ('NVDA', 0.02003), ('TSLA', 0.3463)])

ef1 = EfficientFrontier(mu, Sigma, weight_bounds=(0,1))
minvol=ef1.min_volatility()
minvol_pwt=ef1.clean_weights()
print(minvol_pwt)

OrderedDict([('AAPL', 0.16161), ('AMZN', 0.16646), ('BAC', 0.24537), ('F', 0.10296), ('GOOGL', 0.23731), ('INTC', 0.08628), ('NVDA', 0.0), ('TSLA', 0.0)])

ef1.portfolio_performance(verbose=True, risk_free_rate = 0.27)

Expected annual return: 9.5%
Annual volatility: 27.2%
Sharpe Ratio: -0.64

(0.09488480822354675, 0.27187796811372195, -0.6440948230980068)
```

Рис. 5. Основные характеристики портфеля

Fig. 5. Main characteristics of the portfolio

Годовая процентная доходность — ставка дохода, вычисленная с учётом применения к депозитам или инвестиционным продуктам сложных процентов. Позволяет упростить сравнение доходности для годовых сложных процентов с различающимися интервалами начисления дохода. Дисперсия случайной величины — мера разброса значений случайной величины относительно её математического ожидания.

$$\sigma^2 = \frac{\sum(x_i - \bar{x})}{n}$$

Коэффициент Шарпа — показатель эффективности инвестиционного портфеля (актива), который вычисляется как отношение средней премии за риск к среднему отклонению портфеля.

$$S = \frac{E[R - R_f]}{\sigma}$$

где  $R$  — доходность портфеля (актива),

$R_f$  — доходность от альтернативного вложения (как правило, берётся безрисковая процентная ставка),

$E[R - R_f]$  — премия за риск (математическое ожидание превышения доходности активов над доходностью от альтернативного вложения),

$\sigma$  — стандартное отклонение доходности портфеля (актива). [18]

Следующим этапом является построение кривой «риск/доходность» в модели Марковица, это видно на рис. 5:

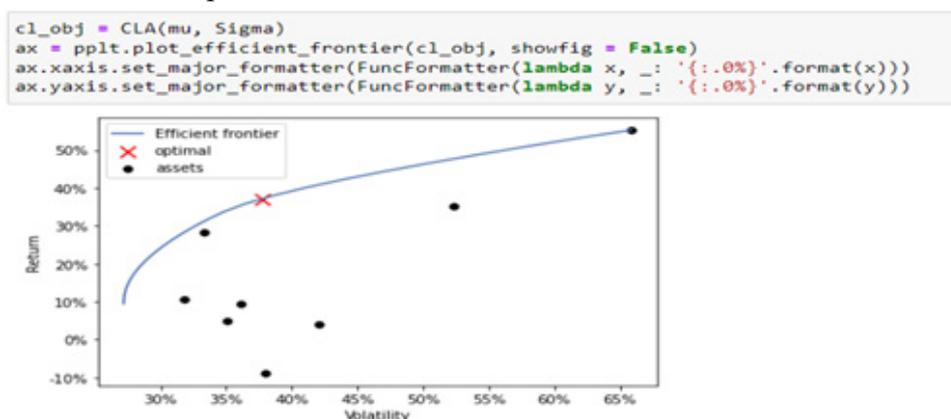


Рис. 6. Кривая риск/доходность портфеля

Fig. 6. Portfolio risk/return curve

После получения графика делается заключение о том, какой портфель из представленных компаний является наилучшим по минимизации рисков и получения максимальной прибыли.

```
latest_prices1 = get_latest_prices(df_stocks)
allocation_shp, rem_shp = DiscreteAllocation(sharpe_pwt, latest_prices1, total_portfolio_value=1000)
print(allocation_shp)
print("Осталось денежных средств после построения портфеля с максимальным коэффициентом Шарпа {:.2f}")
```

{'AMZN': 1, 'BAC': 2, 'F': 19, 'GOOGL': 1, 'INTC': 3, 'TSLA': 2}

Осталось денежных средств после построения портфеля с максимальным коэффициентом Шарпа 32.81

Рис. 7. Финальный результат

Fig. 7. Final result

Для получения конечного результата необходимо внести в программу депозит, которым владеет инвестор. В данной случае для удобства добавим в программу сумму в размере 1000\$. Программа после всех запрограммированных расчетов предложит приобрести одну акцию Amazon и Google, две акции Bank of America и Tesla, три акции Intel и девятнадцать акций Ford.

**Вывод.** В статье представлены результаты обзора одной из самых популярных портфельных теорий, которая была разработана экономистом Гарри Марковицем.

В ходе исследования квантовой торговли были изучены принципы байесовской статистики, анализа временных рядов и машинного обучения, — которые дополняют процесс количественного исследования трейдинга, чтобы помочь обнаружить источники альфы. Многие из этих методов используются некоторыми крупнейшими мировыми управляющими активами и количественными хедж-фондами. Алгоритмы машинного обучения, которые были описаны и применены к финансовым данным для разработки проверяемых систематических торговых стратегий со временем подлежат улучшению и развитию.

Разработана программа для того, что была возможность использовать портфельную теорию не ручными расчётами, а алгоритмическими. Для примера в данной статье использованы акции с биржи Nasdaq. В продолжение данной статьи будет разработан продукт для акций с Московской биржи, так как покупка акции США в данный период несет за собой экономические риски, связанные с прошедшим блокировкой активов в 2022 году. Для этого необходимо будет разработать API для получения исторических данных с новых бирж, так как существующие решения не отвечают требованиям квантовой торговли.

#### Библиографический список:

1. Гитман Л. Дж., Джонк М. Д. Основы инвестирования. Пер. с англ. — М.: Дело, 1997. — 1008 с.
2. Красс М.С., Чупрынов Б.П. Математика для экономистов. - СПб., Питер, 2009. - с. 251.

3. Ю. Ф. Касимов. Основы теории оптимального портфеля ценных бумаг — М: Информационно-издательский дом «Филинъ», 1998. — 144 с.
4. Волкова, П.А. Статистическая обработка данных в учебно-исследовательских работах / П.А. Волкова, А.Б. Шипунов. - М.: Форум, 2012. - 96 с.
5. Большаков А. Методы обработки многомерных данных и временных рядов.- М.: ГЛТ, 2007. - 522 с.
6. Веников В.А., Веников Г.В. Теория подобия и моделирования. – М.: Высшая школа. – 1984. – 439 с.
7. Jansen S. Hands-On Machine Learning for Algorithmic Trading - Бирмингем: Packt Publishing, 2019. – 686 с.
8. Hilpisch Y. Python for Finance: Analyze Big Financial Data – Sebastopol: O’Reilly Media, 2015. – 606 с.
9. Булавин Л.А. Компьютерное моделирование физических систем: учебное пособие / Л.А. Булавин, Н.В. Выгорницкий, Н. И. Лебовка – Долгопрудный: Интеллект, 2011. – 349 с.
10. Морозов В.К. Моделирование информационных и динамических систем: учебное пособие для вузов / В.К. Морозов, Г.Н. Рогачов – М.: Академия, 2011. – 377 с.
11. Емельянов В. В., Курейчик В. В., Курейчик В. М. Теория и практика эволюционного моделирования. – М.: Физматлит, 2003. – С. 432.
12. Маккинни У. Python и анализ данных - Москва: ДМК Пресс, 2015. – 482 с.
13. Григорьев, А.А. Методы и алгоритмы обработки данных: Учебное пособие / А.А. Григорьев. - М.: Инфра-М, 2018. - 384 с.
14. Ma Weiming J. Mastering Python for Finance - Бирмингем: Packt Publishing, 2019. – 428 с.
15. Остроух А.В. Ввод и обработка цифровой информации. Учебник - М.: Academia, 2017. - 384 с.
16. Peter Bruce Practical Statistics for Data Scientists: 50+ Essential Concepts Using R and Python - O’Reilly Media, 2017. – 320 с.
17. Seiersen R. The Metrics Manifesto: Confronting Security with Data – Wiley, 2022. – 320 с.
18. Peter C. Bruce Data Mining for Business Analytics: Concepts, Techniques, and Applications – Wiley, 2016. – 560 с.

#### References

1. Gitman L. J., Dzhonk M. D. Fundamentals of investment. Per. from English. M Delo, 1997;1008. (In Russ)
2. Krass M.S., Chuprynov B.P. Mathematics for economists. - St. Petersburg, Peter, 2009; 251. (In Russ )
3. Yu. F. Kasimov. Fundamentals of the theory of the optimal portfolio of securities - M: Information and Publishing House “Filin”, 1998;144. (In Russ )
4. Volkova P.A., Shipunov A.B. Statistical data processing in educational research work. M.:Forum, 2012; 96. (In Russ )
5. Bol’shakov A. Methods for processing multidimensional data and time series. M.: GLT, 2007; 522.(In Russ )
6. Venikov V.A., Venikov G.V. Theory of similarity and modeling. M.: Higher school. 1984; 439 (In Russ )
7. Jansen S. Hands-On Machine Learning for Algorithmic Trading - Birmingham: Packt Publishing, 2019; 686.
8. Hilpisch Y. Python for Finance: Analyze Big Financial Data - Sebastopol: O’Reilly Media, 2015; 606.
9. Bulavin L.A. Computer modeling of physical systems: textbook / L.A. Bulavin, N.V. Vygornitsky, N. I. Lebovka - Dolgoprudny: Intelligence, 2011; 349. (In Russ )
10. Morozov V.K. Modeling of information and dynamic systems: a textbook for universities / V.K. Morozov, G.N. Rogachov - M .: Academy, 2011; 377.(In Russ )
11. Emelyanov V. V., Kureichik V. V., Kureichik V. M. Theory and practice of evolutionary modeling. – M.: Fizmatlit, 2003; 432. (In Russ )
12. McKinney W. Python and data analysis - Moscow: DMK Press, 2015; 482. (In Russ )
13. Grigoriev, A.A. Methods and algorithms for data processing: Textbook M.: Infra-M, 2018; 384. (In Russ )
14. Ma Weiming J. Mastering Python for Finance - Birmingham: Packt Publishing, 2019; 428.
15. Ostroukh, A.V. Input and processing of digital information. Textbook. M.: Academia, 2017; 384.(In Russ )
16. Peter Bruce Practical Statistics for Data Scientists: 50+ Essential Concepts Using R and Python - O’Reilly Media, 2017; 320.
17. Seiersen R. The Metrics Manifesto: Confronting Security with Data - Wiley, 2022; 320.
18. Peter C. Bruce Data Mining for Business Analytics:Concepts, Techniques, and Applications Wiley, 2016; 560.

#### Сведения об авторе:

Байдалин Александр Дмитриевич, аспирант кафедры прикладных информационных технологий и программирования; [alexander.baydalin@gmail.com](mailto:alexander.baydalin@gmail.com)

#### Information about authors:

Alexander D. Baydalin, post-graduate student of the Department of Applied Information Technologies and Programming; [alexander.baydalin@gmail.com](mailto:alexander.baydalin@gmail.com)

#### Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/ Received 23.09.2023.

Одобрена после рецензирования / Revised 15.10.2023.

Принята в печать /Accepted for publication 15.10.2023.

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ**  
**INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS**

УДК 004.021, 004.42

DOI: 10.21822/2073-6185-2023-50-4-59-74

Оригинальная статья /Original article



**Исследование эффективности методов оптимизации программ для параллельных вычислительных систем с GPU**

**А.Ю. Безрученко, В.А. Егунов**

Волгоградский государственный технический университет,

400005, г. Волгоград, проспект им. Ленина, 28, Россия

**Резюме. Цель.** В работе определена актуальность задачи повышения эффективности программного обеспечения, под которой в данном случае понимается сокращение времени работы проектируемого программного обеспечения в процессе решения вычислительно-сложных задач. **Метод.** В качестве примера подобной задачи используется выполнение сингулярного разложения методом Якоби. Данная задача находит свое применение в различных областях от обработки сигналов и изображений до систем искусственного интеллекта. В качестве целевой вычислительной архитектуры выбраны параллельные вычислительные системы, оснащенные GPU. В работе рассматриваются методы повышения эффективности программного обеспечения для целевых вычислительных архитектур с использованием CUDA. **Результат.** Описаны существующие аналитические модели оценки эффективности компьютерных программ. Рассматривается влияние различных оптимизаций, таких как оптимизация пересылок данных, использования системы unified memoгу, количества потоков, паттерна доступа к памяти и ряда других на эффективность получаемого программного обеспечения. Описывается процесс оптимизации программной реализации сингулярного разложения, приводятся результаты вычислительных экспериментов. **Вывод.** При увеличении числа потоков производительность может вырасти больше, чем количество потоков. Влияние паттерна доступа к памяти: при оптимальной последовательности доступа к памяти производительность заметно повышается. Настройка доли памяти, используемой для L1 кеша и для shared memory не оказывает существенного влияния на производительность.

**Ключевые слова:** эффективность программ, оценка эффективности, производительность, многопоточность, SVD, CUDA, GPGPU, NVidia, unified memory

**Для цитирования:** А.Ю. Безрученко, В.А. Егунов. Исследование эффективности методов оптимизации программ для параллельных вычислительных систем с GPU. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023; 50(4):59-74. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-4-59-74

**Investigation of the Effectiveness of Programs Optimization Methods for Parallel Computing Systems with GPU**

**A.Y. Bezruchenko, V.A. Egunov**

Volgograd State Technical University,

28 Lenin Ave., Volgograd 400005, Russia

**Abstract. Objective.** The paper defines the relevance of the task of increasing the efficiency of software, which in this case is understood as reducing the operating time of the designed software in the process of solving computationally complex problems. **Method.** As an example of such a task, the implementation of the singular value decomposition by the Jacobi method is used. This task finds its application in various fields from signal and image processing to artificial intelligence systems. Parallel computing systems equipped with GPU are chosen as the target computing architecture. The paper discusses methods for improving the efficiency of software for target computing

architectures using CUDA. **Result.** The existing analytical models for evaluating the effectiveness of computer programs are described. The influence of various optimizations, such as optimization of data transfers, use of the unified memory system, the number of threads, memory access patterns, and a number of others on the efficiency of the resulting software is considered. The process of optimizing the SVD implementation program is described, the results of computational experiments are presented. **Conclusion.** As the number of threads increases, performance may increase more than the number of threads. Impact of memory access pattern: When the memory access sequence is optimal, performance improves noticeably. Adjusting the share of memory used for L1 cache and shared memory does not have a significant impact on performance

**Keywords:** program efficiency, efficiency evaluation, performance, multithreading, SVD, CUDA, GPGPU, NVidia, unified memory

**For citation:** A.Y. Bezruchenko, V.A. Egunov. Investigation of the Effectiveness of Programs Optimization Methods for Parallel Computing Systems with GPU. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2023; 50(4):59-74. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-4-59-74

**Введение.** С ростом объёмов данных и сложности вычислений оптимизация программ для параллельных систем становится всё более важной задачей. Параллельные системы позволяют эффективно использовать ресурсы вычислительных устройств, обрабатывать большие объёмы данных и сокращать время вычислений. Сингулярное разложение (Singular Value Decomposition, SVD) является дорогостоящим в вычислительном отношении преобразованием линейной алгебры, которое находит свое применение в различных областях: от сжатия данных до решения систем уравнений [1]. SVD часто используется при обработке сигналов и изображений, в различных областях аналитики больших данных: анализ временных рядов [2], тензорная декомпозиция [3]. Его можно использовать в методе главных компонент [4], используемом для уменьшения размерности данных, он используется в статистике [5], во многих других отраслях. В последние годы его начали активно использовать в машинном обучении [6].

В данной работе рассматриваются методы оптимизации программ для графических сопроцессоров (Graphics Processing Unit, GPU) на примере выполнения SVD с использованием метода Якоби. Исследуется влияние различных способов оптимизации, таких как использование unified memory, настройка количества потоков и паттерна доступа к памяти, с целью повышения эффективности вычислений.

**Постановка задачи.** Задача повышения эффективности программного обеспечения является актуальной задачей, привлекающей внимание исследователей. Для достижения данной цели используются различные подходы, которые достаточно условно можно разделить на теоретические и практические методы. К практическим методам можно отнести использование различных отладчиков, профилировщиков и других инструментальных средств, позволяющих улучшать характеристики получаемого программного обеспечения. С другой стороны, разработчики используют различные технологии программирования, оптимизированные алгоритмы и другие практические методы повышения эффективности компьютерных программ. Важную роль в данном случае играют различные математические модели исполнения программного обеспечения, которые позволяют выявить узкие места и повысить итоговую производительность вычислительной системы в целом. Данные модели разрабатываются для разных классов вычислительных систем, далее рассмотрим некоторые подобные модели.

**Методы исследования.** В работе [7] представляется Roofline Model — интуитивная визуальная модель для оценки производительности программного обеспечения на конкретной вычислительной системе. В соответствии с данной моделью строится график, где по оси X откладывается “Operational Intensity (Интенсивность операций) (FLOP/Byte)”, по оси Y – “Attainable (Достижимые) GFLOP/s”. Результат представляется линией (roof), которая сначала с ростом интенсивности операций линейно растёт, пока не достигнет максимума и не останется на нём. Пример такого графика показан на рис.1.

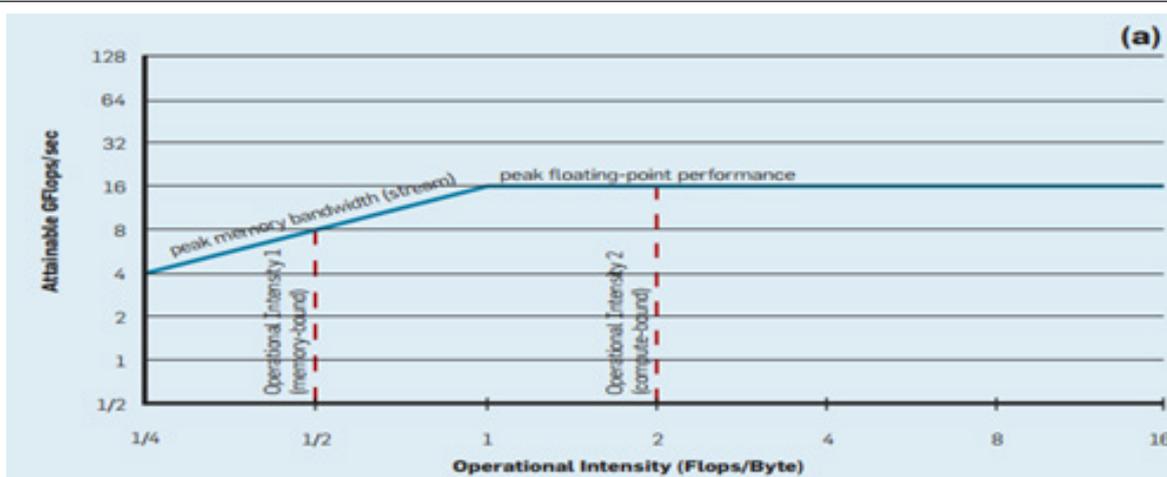


Рис. 1. Пример roofline model

Fig. 1. Example roofline model

Формула вычисления производительности при этом выглядит следующим образом:

$$attainable\ GFlops = \min \left\{ \begin{array}{l} max\_flops \\ max\_throughput \times op\_intensity \end{array} \right\}, \quad (1)$$

где  $max\_flops$  — максимальная производительность при работе с числами;

$max\_throughput$  — максимальная пропускная способность памяти;

$op\_intensity$  — интенсивность операций.

Данный метод не предназначен для определения времени выполнения программы, хотя он и используется для оценки верхней планки производительности вычислительной системы. Он довольно неточен, но при этом достаточно прост в использовании и позволяет оценить, чем именно ограничивается скорость выполнения программы: пропускной способностью памяти или вычислительной мощностью процессоров.

Хотя в данной работе roofline model не используется, приведем советы по повышению производительности в многоядерных системах (на примере Opteron X2), рассмотренные в той же статье [7]: увеличение параллелизма уровня инструкций, применение SIMD; балансировка операций с плавающей запятой (чтобы уравнивать количество сложений и умножений); переписывание циклов на использование шага, равного количеству ядер; использование локальной для ядра память; использование prefetching;

Конкретный вид графика зависит от используемого оборудования. В статье [8] проведен анализ двух видеокарт: AMD HD5850 и NVIDIA C2050, в статье [9] такой же анализ проводится для Xeon Phi и OpenMP. Получить данный график для конкретной вычислительной системы можно с помощью утилиты для бенчмарков Likwid [10]. Хотя изначально данная утилита разрабатывалась под CPU, она была позже адаптирована для работы с GPU от Nvidia [11]. Кроме того, существует также профилировщик Nsight от Nvidia, который также может строить такой график.

Работа [12] представляет модель с упором на уменьшение эффектов расхождения ветвей (branch divergence). Архитектура GPU от NVIDIA содержит несколько потоковых мультипроцессоров (Streaming multiprocessor, SM), каждый из которых состоит из многих потоковых процессоров (Streaming processor, SP). SM координируют выполнение программы на большом количестве потоков, разделяемых на группы по 32 (для Nvidia) потока, называемые варпами (warp).

Потоки внутри варпа начинают исполнение с одного и того же адреса; у каждого потока есть свой счётчик команд и своё состояние регистров. Если все потоки исполняют одни и те же инструкции (имеют одно и то же значение счётчика команд), то их можно исполнять параллельно. Однако в разных потоках могут выполняться разные ветки условных выражений. Когда пути исполнения в разных потоках внутри варпа расходятся, потоки, следующие по разным путям исполнения, выполняются последовательно, отдельно друг

от друга, и затем снова объединяются. В худшем случае каждый поток в варпе выполняется в своей ветке условия; в таком случае в каждый отдельный момент времени выполняется только один поток, и параллелизм на самом деле отсутствует. Данный эффект может заметно влиять на производительность приложений GPU [12].

Различные способы уменьшения расхождения исследовались в статьях [13] и [14], где предлагается динамически разделять варпы на уровне устройства, а также в статье [15], где предлагалось переназначение памяти на уровне программного обеспечения.

CUDA (Compute Unified Device Architecture) представляет собой программно-аппаратную архитектуру параллельных вычислений, которая позволяет существенно увеличить производительность вычислительной системы благодаря использованию графических процессоров фирмы Nvidia. Описание CUDA доступно в официальных руководствах [16]. В данной архитектуре GPU состоит из массива потоковых мультипроцессоров (Streaming Multiprocessor, SM). В процессе выполнения программа разбивается на блоки потоков, каждый блок выполняется независимо друг от друга. Поэтому GPU с большим числом SM в общем случае будет исполнять программы быстрее, чем GPU с меньшим числом SM.

CUDA позволяет задавать специальные функции, ядра (kernel), которые выполняются параллельно на нескольких CUDA потоках. Количество потоков в блоке ограничено (не более 1024), однако ядро может выполняться на нескольких блоках. Предполагается, что блоки выполняются независимо друг от друга, в любом порядке. Потоки внутри блока могут кооперироваться друг с другом, делясь данными через общую память.

На GPU с Compute Capability 9.0 есть дополнительный опциональный уровень иерархии — кластеры блоков потоков. Так же, как потоки в блоке гарантированно выполняются на одном мультипроцессоре, блоки в кластере выполняются на одном обрабатывающем кластере (GPU Processing Cluster, GPC). Также есть функция для синхронизации блоков в кластере. Модель памяти CUDA представлена на рис. 2.

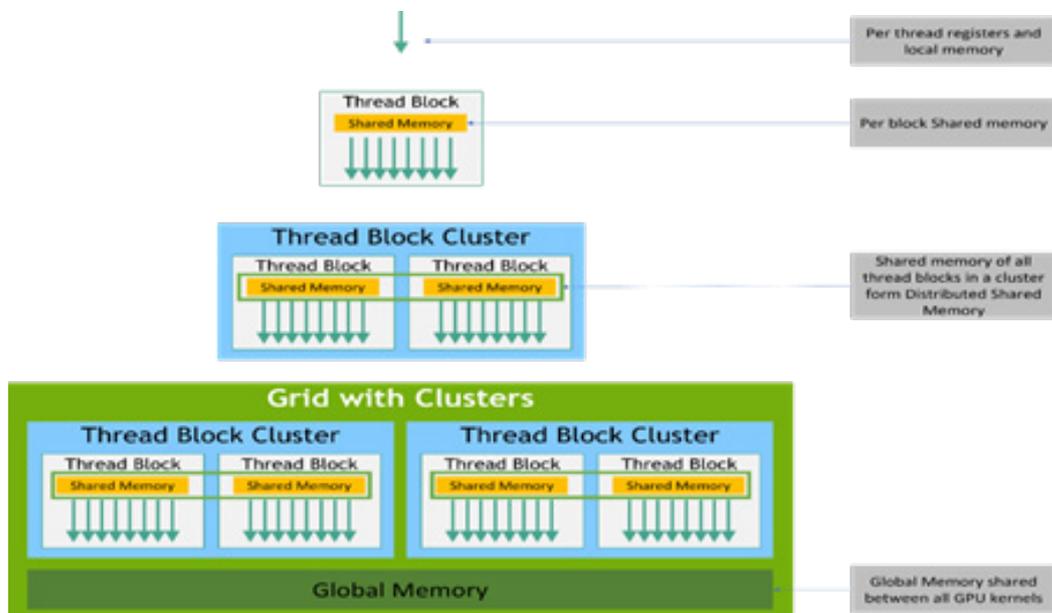


Рис. 2. Модель памяти CUDA  
Fig. 2. CUDA memory model

Каждый поток имеет свою локальную память. При этом у каждого блока есть общая (shared) память, доступная всем потокам в блоке и имеющая такое же время жизни, что и время жизни блока. Доступ к shared memory своего блока есть у всех потоков. Кроме того, есть два пространства памяти только для чтения: константная и текстурная память. Глобальная, константная и текстурная памяти сохраняют свои значения между запусками одного и того же приложения.

Начиная с Compute Capability 9.0, появилась распределённая общая память (distributed shared memory). Эта система позволяет блокам внутри кластера обращаться к shared memory других блоков того же кластера. Поддерживается чтение, запись и некоторые атомарные операции над shared memory других блоков, а также синхронизация блоков внутри кластера.

Ранее предполагалось, что устройство и хост имеют разную память, при этом попытка обратиться к неправильному виду памяти вызывала ошибку. Начиная с Compute Capability 3 появилась объединённая память (unified memory). Она доступна как из CPU, так и из GPU по одному и тому же адресу. Данной памятью можно воспользоваться либо выделив её с помощью функции `cudaMallocManaged()`, либо с помощью глобальных переменных с модификаторами `__device__` и `__managed__`.

Начиная с версии CUDA 8.0 и Compute Capability 6.0, unified memory используется по умолчанию; память, выделенная с помощью `malloc` или `new`, доступна как на GPU, так на CPU, так что отпадает необходимость вручную пересылать данные между устройствами. Более подробно о производительности unified memory в CUDA можно почитать в статьях [17] (общий обзор unified memory) и [18] (обзор приёмов по улучшению производительности).

Данные в unified memory пересылаются на устройство, использующее их. Например, если код, исполняемый на GPU, обращается к участку памяти, который в текущий момент находится в оперативной памяти компьютера, то данные пересылаются на GPU, и программа на GPU может работать с ними так, будто память расположена на самом GPU. Когерентность в данном случае ставится выше производительности: рассинхронизации памяти нет, т.к. при запросе памяти, ранее использовавшейся другим вычислителем (где под вычислителем подразумевается, например, CPU или GPU), она пересылается на необходимый вычислитель. При этом частые пересылки данных могут вредить производительности. Вне зависимости от физического расположения памяти на текущий момент, указатели на неё остаются валидными и могут быть использованы на каждом вычислителе. На GPU с Compute Capability менее 6.x при запросе памяти пересылается вся память целиком, в 6.x введён механизм page fault, так что память пересылается страницами по запросу. Начиная с Compute Capability 6.0, память при вызове `cudaMallocManaged()` физически выделяется не сразу, а при первом обращении к выделенному массиву. Также появилась возможность запросить больше виртуальной памяти, чем есть физической на устройстве. До версии 6.0 такой возможности не было, и вся запрошенная память сразу же выделяется, либо выдаётся ошибка о недостаточном количестве памяти.

Стоит отметить, что многие возможности управляемой памяти, добавленные с Compute Capability 6, не работают в Windows. Когда варп выполняет запрос к памяти, его исполнение приостанавливается и начинает исполняться другой варп до тех пор, пока память не будет готова. Если несколько потоков в одном варпе запрашивают память в последовательно расположенных участках памяти, то эти запросы могут быть объединены в одну или несколько транзакций [16], ускоряя доступ к памяти. Из-за этого в циклах, обрабатывающих массив элементов, рекомендуется шаг цикла сделать равным количеству используемых потоков, а начальное значение — номеру потока; так потоки будут запрашивать последовательно расположенные адреса памяти [19]. Shared память в устройствах с Compute Capability 7.x может делить одну и ту же физическую память с L1 кешем [16]. Это же касается и Compute Capability 8.x и 9.x [16]. Если shared память не используется, можно использовать больше памяти под L1 кеш.

**Обсуждение результатов.** В качестве базовой задачи было выбрано выполнение SVD методом Якоби. На первом этапе была реализована версия для CPU. Профилирование программы показало, что перемножение матриц при повороте занимает 80-85% всего времени выполнения, поэтому в первую очередь необходимо оптимизировать выполнение данной операции. На основе версии для CPU была реализована версия программы для GPU, в которой перемножение матриц при повороте вынесено на GPU.

Сравним время исполнения реализаций для CPU и для GPU. Для сравнения

использовались: процессор — Ryzen 5 2600, видеокарта — Nvidia GTX 1650 (архитектура Turing, compute capability 7.5), ОС — Windows 10. Замер производился на квадратных матрицах, размеры используемых матриц приведены в табл.1. Вычисления производились несколько раз, в табл.1 приведено среднее значение времени исполнения. Для замера времени использовалась функция `std::chrono::steady_clock::now()`, которая в использованной Visual Studio 2019 является обёрткой над `QueryPerformanceCounter`, которая способна обеспечить точность до микросекунды [20]; измерения осуществлялись с точностью до миллисекунды. Сравнение времени исполнения реализации на CPU, на GPU, а также реализации этого же алгоритма в `cusolver`, показано в табл. 1.

Таблица 1. Сравнение производительности в процессе выполнения SVD

Table 1. Comparison of performance during SVD execution

Размер матриц Matrix size	Время выполнения на CPU, с Lead time	Время выполнения на GPU, с Lead time	Время выполнения Cusolver, с Lead time
25	0.002	0.456	0.001
50	0.021	1.31	0.001
75	0.081	3.44	0.001
100	0.201	7.599	0.001
125	0.439	11.796	0.001

Как видно, реализованная первоначальная версия работает необычно медленно. Разберёмся в причинах. Проанализируем, каким образом выполняются различные части алгоритма. В листингах комментарием «CPU» отмечены участки, выполняющиеся на CPU (и при этом запрашивающие память, физически в данный момент расположенную на GPU), комментарием «GPU» — выполняющиеся на GPU, «GPU/CPU» — смешанные.

В листинге 1 показана функция `jacobi_svd`. Она лишь выделяет память (`alloc_matrix_gpu` внутри себя вызывает `cudaMallocManaged()`) и копирует её из изначального массива, вся логика расположена в функции `jacobi_svd_gpu`. Стоит отметить, что `cudaMallocManaged()` выделяет память, которая будет управляться системой `unified memory`. К указателю на эту память можно обращаться как с хоста, так и с устройства, система сама пересылает данные туда, где они используются, однако использование этой системы может в некоторых случаях замедлять программу.

Листинг 1. Функция `jacobi_svd`

```
void jacobi_svd(double* A, int m, double* s, double* u, double* vt)
{
    double* cuda_A = alloc_matrix_gpu(m);
    .....
    double* buff5 = alloc_matrix_gpu(m);
    cudaMemcpy(cuda_A, A, m * m * sizeof(double), cudaMemcpyDefault);
    jacobi_svd_gpu(cuda_A, m, cuda_s, cuda_u, cuda_v, buff1, buff2, buff3, buff4, buff5);
    cudaDeviceSynchronize();
    cudaMemcpy(s, cuda_s, m * sizeof(double), cudaMemcpyDefault);
    cudaMemcpy(u, cuda_u, m * m * sizeof(double), cudaMemcpyDefault);
    cudaMemcpy(vt, cuda_v, m * m * sizeof(double), cudaMemcpyDefault);
    cudaFree(buff1);
    .....
    cudaFree(cuda_v);
}
```

В листинге 2 показана функция `jacobi_svd_gpu`.

Листинг 2. Анализ функции `jacobi_svd_gpu`

```
void jacobi_svd_gpu(double* A, int m, double* s, double* u, double* vt, double* buff1,
double* buff2, double* buff3, double* buff4, double* buff5)
{
    fill_as_identity(vt, m); // CPU
    fill_as_identity(u, m); // CPU
    while (not_converged(A, m)) // CPU
    {
        for (int j = 0; j < m - 1; j++)
```

```

        for (int k = j + 1; k < m; k++)
            jacobi_rotation(A, m, j, k, buff1, buff2, buff3, buff4, buff5, u, vt); //
CPU/GPU
    }
    for (int i = 0; i < m; i++)
    {
        s[i] = getSum(A, m, i); // CPU
    }
}

```

В ней можно выделить следующие действия: формирование единичных матриц  $u$  и  $vt$ ; вызов `jacobi_rotation` в цикле; формирование сумм элементов столбцов полученной матрицы. Инициализация  $u$  и  $vt$  происходит в функции `fill_as_identity` (листинг 3).

В ней происходит обращение к матрице из функции хоста. Проверка условия останова (листинг 4) и сложение элементов в столбце (листинг 5) также выполняются на хосте и тоже обращаются к матрице. Позже, в функции `jacobi_rotation`, к этой матрице будет обращаться код, исполняемый на GPU, и потребуются пересылка данных.

Листинг 3. Функция `fill_as_identity`

```

void fill_as_identity(double* matrix, int m)
{
    for (int i = 0; i < m; i++)
        for (int j = 0; j < m; j++)
            matrix[IDX2C(i, j, m)] = (i == j ? 1 : 0);
}

```

Листинг 4. Функция `not_converged`

```

bool not_converged(double* A, int m)
{
    for (int i = 0; i < m; i++)
        for (int j = 0; j < m; j++)
            if (i != j && fabs(A[IDX2C(i, j, m)]) > offdiagonal_threshold)
                return true;
    return false;
}

```

Листинг 5. Функция `getSum`

```

double getSum(double* matrix, int m, int column)
{
    double sum = 0;
    for (int i = 0; i < m; i++)
    {
        sum += matrix[IDX2C(column, i, m)];
    }
    return sum;
}

```

Проанализируем функцию `jacobi_rotation` (листинг 6). В ней выполняются следующие действия: проверяется, чтобы текущий элемент был больше порогового значения для останова формируется матрицу поворотов  $R$  и транспонируем ее  $RT$  вычисляется  $A = R \times A \times RT$ ,  $V = R \times V$ ,  $U = U \times RT$  (здесь используется GPU)

Листинг 6. Анализ функции `jacobi_rotation`

```

void jacobi_rotation(double* A, int m, int j, int k, double* buff1, double* buff2,
double* buff3, double* buff_r, double* buff_rt, double*& U, double*& V)
{
    if (fabs(A[IDX2C(j, k, m)]) > offdiagonal_threshold) // CPU
    {
        double tau = (A[IDX2C(j, j, m)] - A[IDX2C(k, k, m)]) / (2 * A[IDX2C(j, k,
m)]); // CPU
        double t = sign(tau) / (abs(tau) + sqrt(1 + tau * tau));
        double c = 1 / sqrt(1 + t * t);
        double s = c * t;
        fill_as_identity(buff_r, m); // CPU
    }
}

```

```

    buff_r[IDX2C(j, j, m)] = get_R(j, j, j, k, c, s); // CPU
    buff_r[IDX2C(j, k, m)] = get_R(j, k, j, k, c, s); // CPU
    buff_r[IDX2C(k, j, m)] = get_R(k, j, j, k, c, s); // CPU
    buff_r[IDX2C(k, k, m)] = get_R(k, k, j, k, c, s); // CPU
    fill_as_identity(buff_rt, m); // CPU
    buff_rt[IDX2C(j, j, m)] = get_RT(j, j, j, k, c, s); // CPU
    buff_rt[IDX2C(j, k, m)] = get_RT(j, k, j, k, c, s); // CPU
    buff_rt[IDX2C(k, j, m)] = get_RT(k, j, j, k, c, s); // CPU
    buff_rt[IDX2C(k, k, m)] = get_RT(k, k, j, k, c, s); // CPU
    // GPU
    multiply_matrices_only_jk(buff_r, A, buff1, m, j, k, false);
    // GPU
    multiply_matrices_only_jk(buff_r, V, buff2, m, j, k, false);
    // GPU
    multiply_matrices_only_jk(U, buff_rt, buff3, m, j, k, true);
    cudaDeviceSynchronize();
    // GPU
    multiply_matrices_only_jk(buff1, buff_rt, A, m, j, k, true);
    // GPU
    cudaMemcpy(V, buff2, m * m * sizeof(double), cudaMemcpyDefault);
    // GPU
    cudaMemcpy(U, buff3, m * m * sizeof(double), cudaMemcpyDefault);
    cudaDeviceSynchronize();
}
}

```

Функции формирования матрицы поворотов и проверки условия останова выполняются на хосте и обращаются к памяти устройства.

При этом перемножение матриц поворота (`multiply_matrices_only_jk`, листинг 7) уже запускает ядро (`multiply_matrices_only_jk_gpu`, листинг 8), которое обращается к функциям на GPU (`multiply_matrices_only_jk_gpu_row` и `multiply_matrices_only_jk_gpu_column`, листинг 9). Выбор начального индекса и шага в цикле будет объяснён позднее, когда будет рассматриваться влияние паттерна доступа к памяти на производительность; также он объяснён в [21]. Кроме того, стоит отметить группировку потоков по операциям (см. листинг 8): потоки в блоке распределяются на 4 подблока так, чтобы номера потоков в каждом подблоке шли последовательно. Если доступно больше одного варпа, то желательно, чтобы все потоки внутри варпа были на одной и той же ветви условного выражения. Если это не так, то возникает проблема расхождения ветвей [12].

Листинг 7. Функция `multiply_matrices_only_jk`

```

void multiply_matrices_only_jk(double* first, double* second, double* res, int size,
int j, int k, bool keepFirst)
{
    if (keepFirst)
        cudaMemcpy(res, first, size * size * sizeof(double), cudaMemcpyDefault);
    else
        cudaMemcpy(res, second, size * size * sizeof(double), cudaMemcpyDefault);
    const int num_warps = 1;
    const int num_threads = num_warps * 32;
    multiply_matrices_only_jk_gpu << <1, num_threads >> > (first, second, res, size,
j, k);
}

```

Листинг 8. Функция `multiply_matrices_only_jk_gpu`

```

__global__ void multiply_matrices_only_jk_gpu(double* first, double* second, double*
res, int size, int j, int k)
{
    int subblockSize = blockDim.x / 4;
    int operation = threadIdx.x / subblockSize;
}

```

```

int start_index = threadIdx.x % subblockSize;
switch (operation)
{
case 0:
multiply_matrices_only_jk_gpu_row(first, second, res, size, j, start_index,
subblockSize);
break;
case 1:
multiply_matrices_only_jk_gpu_row(first, second, res, size, k, start_index,
subblockSize);
break;
case 2:
multiply_matrices_only_jk_gpu_column(first, second, res, size, j, k, j, start_
index, subblockSize);
break;
case 3:
multiply_matrices_only_jk_gpu_column(first, second, res, size, j, k, k, start_
index, subblockSize);
break;
}
}

```

## Листинг 9. Функции умножения строки и столбца

```

__device__ void multiply_matrices_only_jk_gpu_row(double* first, double* second,
double* res, int size, int row, int start_index, int stride)
{
for (int b_ = start_index; b_ < size; b_ += stride)
{
double sum = 0;
for (int c_ = 0; c_ < size; c_++)
sum += first[IDX2C(row, c_, size)] * second[IDX2C(c_, b_, size)];
res[IDX2C(row, b_, size)] = sum;
}
}
__device__ void multiply_matrices_only_jk_gpu_column(double* first, double* second,
double* res, int size, int ignore_row_1, int ignore_row_2,
int column, int start_index, int stride)
{
for (int a_ = start_index; a_ < size; a_ += stride)
{
if (a_ != ignore_row_1 && a_ != ignore_row_2)
{
double sum = 0;
for (int c_ = 0; c_ < size; c_++)
sum += first[IDX2C(a_, c_, size)] * second[IDX2C(c_, column, size)];
res[IDX2C(a_, column, size)] = sum;
}
}
}

```

Как видно в листинге 6, участки кода, обращающиеся к памяти с хоста, находятся в одной функции с участками кода, обращающимися к памяти с устройства. Как видно в листинге 2, эта функция вызывается в цикле множество раз, и на каждой итерации необходимо переслать данные на устройство и обратно. Это оказывает сильное негативное влияние на производительность.

Вынесем всю работу с матрицами на GPU. Функция `jacobi_svd` остаётся без изменений. Функция `jacobi_svd_gpu` также почти не изменилась (листинг 10), единственное отличие — вынос получения сумм по столбцам в функцию; однако при этом из-за изменений вызываемых функций все действия выполняются на GPU, избавляя от необходимости пересылать данные в оперативную память.

Листинг 10. Изменённая функция `jacobi_svd_gpu`

```

void jacobi_svd_gpu(double* A, int m, double* s, double* u, double* vt, double* buff1,
double* buff2, double* buff3, double* buff4, double* buff5)
{
    fill_as_identity(vt, m); // GPU
    fill_as_identity(u, m); // GPU
    while (!is_converged(A, m)) // GPU
    {
        for (int j = 0; j < m - 1; j++)
            for (int k = j + 1; k < m; k++)
                jacobi_rotation(A, m, j, k, buff1, buff2, buff3, buff4, buff5, u, vt); //
GPU
    }
    dim3 block_dim(num_threads, 1, 1);
    dim3 grid_dim(num_blocks, 1, 1);
    getSums << <grid_dim, block_dim >> > (A, s, m); // GPU
}

```

В листинге 11 показана изменённая функция формирования единичной матрицы. Как видно, теперь изменение памяти, выделенной на устройстве, происходит в ядре, выполняемом на самом устройстве. Аналогично работа с памятью устройства была перенесена на устройство и в проверке условия останова (листинг 12), на хост пересылается только результат. Также вынесение вычислений на GPU было проведено в функции `getSums`; оно достаточно простое, поэтому не будем его здесь рассматривать.

Листинг 11. Изменённая функция `fill_as_identity`

```

void fill_as_identity(double* matrix, int m)
{
    dim3 block_dim(num_threads, 1, 1);
    dim3 grid_dim(num_blocks, 1, 1);
    fill_as_identity_gpu << <grid_dim, block_dim >> > (matrix, m);
}

```

Листинг 12. Изменённая функция `is_converged`

```

__global__ void is_converged_gpu(double* A, int m, bool* is_converged)
{
    for (int i = blockIdx.x * blockDim.x + threadIdx.x; i < m; i += blockDim.x *
gridDim.x)
    {
        if (fabs(A[i]) > offdiagonal_threshold && (i % m != i / m))
        {
            *is_converged = false;
            return;
        }
    }
}

bool is_converged(double* A, int m)
{
    bool is_converged = true;
    bool* is_converged_d;
    cudaMalloc(&is_converged_d, sizeof(bool));
    cudaMemcpy(is_converged_d, &is_converged, sizeof(is_converged),
cudaMemcpyDefault);
    is_converged_gpu << <1, num_threads >> > (A, m, is_converged_d);
    cudaMemcpy(&is_converged, is_converged_d, sizeof(is_converged),
cudaMemcpyDefault);
    cudaFree(is_converged_d);
    return is_converged;
}

```

Проанализируем функцию `jacobi_rotation` после изменения (листинг 13). Пересылка

элемента в память GPU сделана явной (добавлена функция `cudaMemcpy`).

Листинг 13. Изменённая функция `jacobi_rotation`

```
void jacobi_rotation(double* A, int m, int j, int k,
    double* buff1, double* buff2, double* buff3, double* buff_r, double* buff_rt, double*&
    U, double*& V)
{
    double a_jk;
    cudaMemcpy(&a_jk, &A[IDX2C(j, k, m)], sizeof(double), cudaMemcpyDefault); // GPU
    if (fabs(a_jk) > offdiagonal_threshold_cpu)
    {
        double t = get_t(A, m, j, k); // GPU
        double c = 1 / sqrt(1 + t * t);
        double s = c * t;
        fill_as_r(buff_r, m, j, k, c, s); // GPU
        fill_as_rt(buff_rt, m, j, k, c, s); // GPU
        // GPU
        multiply_matrices_only_jk(buff_r, A, buff1, m, j, k, false);
        // GPU
        multiply_matrices_only_jk(buff_r, V, buff2, m, j, k, false);
        // GPU
        multiply_matrices_only_jk(U, buff_rt, buff3, m, j, k, true);
        cudaDeviceSynchronize();
        // GPU
        multiply_matrices_only_jk(buff1, buff_rt, A, m, j, k, true);
        // GPU
        cudaMemcpy(V, buff2, m * m * sizeof(double), cudaMemcpyDefault);
        // GPU
        cudaMemcpy(U, buff3, m * m * sizeof(double), cudaMemcpyDefault);
        cudaDeviceSynchronize();
    }
}
```

Вычисление тангенса угла поворота вынесено в отдельную функцию. Для вычислений необходимы некоторые значения из памяти устройства, их также копируем явно (листинг 14).

Листинг 14. Функция `get_t`

```
double get_t(double* A, int m, int j, int k)
{
    double jj, kk, jk;
    cudaMemcpy(&jj, &A[IDX2C(j, j, m)], sizeof(double), cudaMemcpyDefault);
    cudaMemcpy(&kk, &A[IDX2C(k, k, m)], sizeof(double), cudaMemcpyDefault);
    cudaMemcpy(&jk, &A[IDX2C(j, k, m)], sizeof(double), cudaMemcpyDefault);
    double tau = (jj - kk) / (2 * jk);
    double t = sign(tau) / (abs(tau) + sqrt(1 + tau * tau));
    return t;
}
```

Аналогично было сделано заполнение матриц поворота (листинг 15).

Листинг 15. Изменённое заполнение матриц поворота

```
void fill_as_r(double* matrix, int m, int j, int k, double c, double s)
{
    fill_as_identity(matrix, m);
    double jj = get_R(j, j, j, k, c, s);
    double jk = get_R(j, k, j, k, c, s);
    double kj = get_R(k, j, j, k, c, s);
    double kk = get_R(k, k, j, k, c, s);
    cudaMemcpy(&matrix[IDX2C(j, j, m)], &jj, sizeof(double), cudaMemcpyDefault);
    cudaMemcpy(&matrix[IDX2C(j, k, m)], &jk, sizeof(double), cudaMemcpyDefault);
    cudaMemcpy(&matrix[IDX2C(k, j, m)], &kj, sizeof(double), cudaMemcpyDefault);
    cudaMemcpy(&matrix[IDX2C(k, k, m)], &kk, sizeof(double), cudaMemcpyDefault);
}
```

```

void fill_as_rt(double* matrix, int m, int j, int k, double c, double s)
{
    fill_as_identity(matrix, m);
    double jj = get_RT(j, j, j, k, c, s);
    double jk = get_RT(j, k, j, k, c, s);
    double kj = get_RT(k, j, j, k, c, s);
    double kk = get_RT(k, k, j, k, c, s);
    cudaMemcpy(&matrix[IDX2C(j, j, m)], &jj, sizeof(double), cudaMemcpyDefault);
    cudaMemcpy(&matrix[IDX2C(j, k, m)], &jk, sizeof(double), cudaMemcpyDefault);
    cudaMemcpy(&matrix[IDX2C(k, j, m)], &kj, sizeof(double), cudaMemcpyDefault);
    cudaMemcpy(&matrix[IDX2C(k, k, m)], &kk, sizeof(double), cudaMemcpyDefault);
}

```

Сравним производительность до и после этого изменения, а также сравним с производительностью программы, написанной без использования unified memory (эта версия будет отличаться тем, что при выделении памяти будет использоваться функция cudaMalloc(), а не cudaMallocManaged()). Сравнение приведено в табл. 2. Все замеры производились на 32 потоках.

**Таблица 2. Сравнение времени исполнения на GPU до изменений и после**  
**Table 2. Comparison of execution time on the GPU before and after changes**

Размер Size	До Before	После, unified	После, не unified
25	0.478	0.371	0.285
50	1.319	1.086	0.819
75	3.385	2.241	1.837
100	6.687	4.038	3.468

Как видно, уменьшение пересылок памяти заметно ускорило программу; отказ от unified memory также заметно помог. Можно сделать вывод, что на GTX 1650 использование unified memory в данном случае только вредит производительности, причём не только напрямую, но и косвенно, позволяя не думать о пересылке данных и, как следствие, поощряя программистов разрабатывать неоптимальный код.

Помимо этого, мы можем повысить производительность, увеличив количество используемых потоков. Хотя количество потоков можно задать произвольным, оно в идеале должно быть кратно 32, потому что потоки выделяются варпами — группами по 32 (стоит отметить, что на GPU AMD или в будущем число потоков в варпе может быть другим).

В табл. 3 и на рис. 3 указано время исполнения при разных размерах матрицы и разном количестве блоков и потоков, замеры времени исполнения осуществлялось аналогично предыдущим опытам. В первом столбце указано количество блоков и количество потоков в каждом блоке, далее в столбцах указаны размеры матрицы.

Как видно из табл. 3, увеличение числа потоков ожидаемо ускоряет выполнение программы; при этом увеличение числа используемых блоков при равном общем числе потоков также немного увеличивает производительность.

**Таблица 3. Время выполнения программы при разной конфигурации**  
**Table 3. Program execution time for different configurations**

Число блоков × потоков/ Number of blocks × threads	32	64	96	128	160	192	224	256
1 × 32	0.356	1.246	3.015	6.091	10.839	18.045	28.026	41.129
1 × 64	0.319	0.934	1.895	3.282	5.23	8.075	11.8	17.019
2 × 32	0.322	0.929	1.879	3.283	5.200	7.921	11.59	16.816
1 × 128	0.318	0.866	1.633	2.657	3.993	5.692	7.804	10.397
2 × 64	0.314	0.86	1.694	2.626	3.937	5.697	7.651	10.239
4 × 32	0.309	0.853	1.599	2.598	3.891	5.447	7.427	9.875

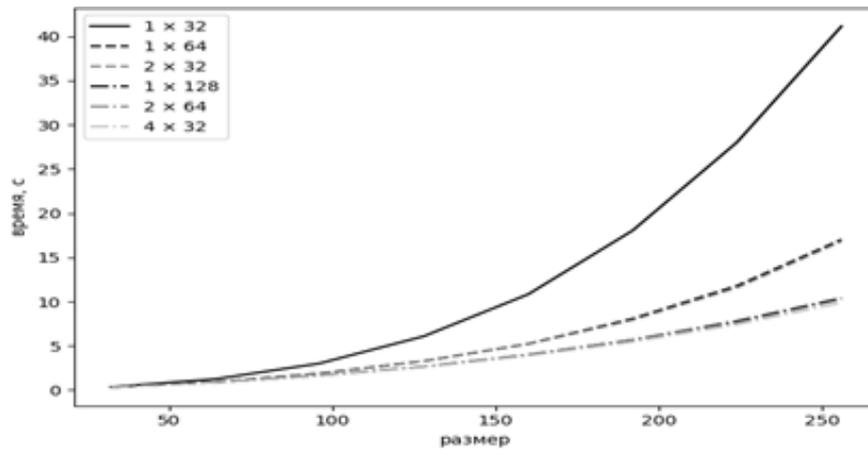


Рис. 3. Зависимость времени исполнения от конфигурации потоков  
 Fig. 3. Dependence of execution time on thread configuration

Интересной особенностью устройств Nvidia, начиная с Compute Capability 7.x, является то, что shared память в них может делить одну и ту же физическую память с L1 кешем [16].

Это же касается и Compute Capability 8.x и 9.x [16]. Если shared память не используется, можно использовать больше памяти под L1 кеш. Это соотношение задаётся параметром cudaFuncAttributePreferredSharedMemoryCarveout. Значению 0 соответствует максимальному размеру кеша, значению 100 — максимальный размер общей памяти.

Стоит отметить, что установка этого параметра не гарантирует задания соответствующего соотношения. Параметр указывается программистом, но драйвер может его проигнорировать, если сочтёт нужным. Эксперименты показали, что установка различных значений для данного параметра не оказали заметного влияния на производительность.

Ещё одна возможность для оптимизации — паттерн доступа к памяти. Доступ к последовательно расположенным адресам в памяти может объединяться в одну или несколько транзакций в зависимости от размера [16]. Если адреса, запрашиваемые потоками в варпе, не расположены последовательно, то требуется больше транзакций и, следовательно, больше времени уходит на пересылку данных.

Таким образом, оптимальный способ обработки элементов в цикле — взять за шаг цикла количество потоков, а за начальное значение — номер потока. В таком случае на каждой итерации цикла запрашиваемые данные будут располагаться последовательно.

Рис. 4 и 5 иллюстрирует это для случая 2 потоков, обрабатывающих 8 элементов. Элементы, запрашиваемые на указанной итерации цикла, закрашены зелёным цветом. Слева указано время, снизу под элементами указано, какой из потоков их обрабатывает (потоки обозначены как T1 и T2).

Как видно на рис. 4 и 5, при шаге цикла, равном 1, на каждой итерации запрашиваются разрозненные участки памяти. В это время при шаге цикла, равному числу потоков, на каждой итерации запрашиваются смежные участки памяти.

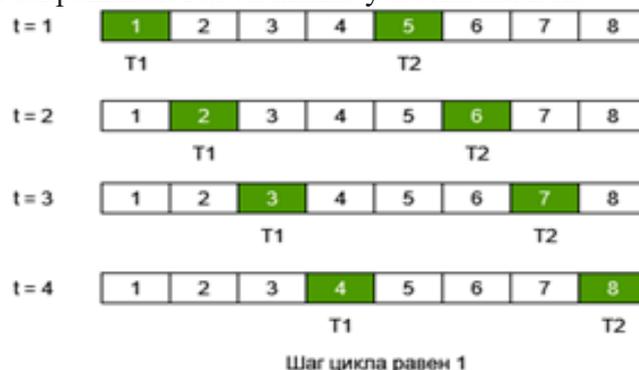


Рис. 4. Доступ к данным при шаге 1  
 Fig. 4. Accessing data in step 1



Рис. 5. Доступ к данным при шаге, равному количеству потоков

Fig. 5. Data access at a step equal to the number of threads

Проанализируем, каким образом паттерн доступа к памяти (шаг в цикле) влияет на время исполнения (табл. 4) при 256 потоках.

Таблица 4. Сравнение времени исполнения при разном шаге цикла

Table 4. Comparison of execution time at different cycle steps

Размер Size	Шаг цикла 1 Cycle step	Шаг цикла 256 Cycle step
100	1.748±0.015	1.871±0.086
200	6.125±0.022	6.007±0.154
300	13.467±0.133	12.958±0.05
400	28.458±0.136	26.36 ±0.149
500	45.637±0.183	39.18 ±0.126

Как видно, при шаге, равном количеству потоков, программа работает заметно быстрее (на большем количестве элементов).

**Вывод.** В данной статье были рассмотрены некоторые способы оптимизации программ под GPU. Было экспериментально определено, что использование unified memory, упрощает разработку программ, в проведенных экспериментах ухудшает итоговую производительность вычислительной системы, увеличивая время выполнения программ. Было замечено, что при увеличении числа потоков производительность может вырасти больше, чем количество потоков. Было также проверено влияние паттерна доступа к памяти на время исполнения.

Можно сделать вывод, что при оптимальной последовательности доступа производительность заметно повышается. Также было исследовано влияние настройки доли памяти, используемой для L1 кеша и для shared memory. Было показано, что данный параметр не оказывает существенного влияния на производительность.

Данные выводы были получены для реализации SVD на конкретном оборудовании (GTX 1650).

Дальнейшие исследования могут включать более подробный анализ производительности при различных параметрах программы, а также применение других методов оптимизации для дальнейшего улучшения производительности параллельных вычислительных систем.

#### Библиографический список:

1. A. G. Akritas and G. I. Malaschonok, "Applications of singular-value decomposition (SVD)," Mathematics and Computers in Simulation, vol. 67, pp. 15-31, 2004
2. Natarajan, Venkatanathan. "Singular Spectral Analysis (Ssa) of Solid Earth Tide (Set)-Implications to Identify Earthquake Precursors and Earthquakes in the Himalayan Region (M≥ 6) During 1991-2021." (2022).
3. Ahmadi-Asl S. et al. Randomized algorithms for computation of Tucker decomposition and higher order SVD (HOSVD), 2021, IEEE Access, vol. 9, pp. 28684-28706
4. Wall M. E., Rechtsteiner A., Rocha L. M. Singular value decomposition and principal component analysis //A practical approach to microarray data analysis. – Boston, MA : Springer US, 2003. – С. 91-109.
5. Hammarling S. The singular value decomposition in multivariate statistics //ACM Signum Newsletter. – 1985. – Т. 20. – №. 3. – С. 2-25.

6. Amey J. L. et al. Neural network interpretation using descrambler groups //Proceedings of the National Academy of Sciences. – 2021. – Т. 118. – №. 5. – С. e2016917118.
7. S. Williams, A. Waterman, and D. Patterson, “Roofline: An Insightful Visual Performance Model for Multicore Architectures,” *Comm. ACM*, vol. 52, no. 4, pp. 65-76, 2009
8. H. Jia, Y. Zhang, G. Long, J. Xu, S. Yan, and Y. Li, “GPU Roofline: A Model for Guiding Performance Optimizations on GPUs,” *Proc. 18th Int’l Conf. Parallel Processing (Euro-Par ’12)*, vol. 7484, pp. 920-932, 2012.
9. T. Cramer, D. Schmidl, M. Klemm, and D. an Mey, “OpenMP Programming on Intel Xeon Phi Coprocessors: An Early Performance Comparison,” *Proc. Many-Core Applications Research Community Symp. at RWTH Aachen Univ.*, pp. 38-44, 2012.
10. J. Treibig, G. Hager and G. Wellein: LIKWID: A lightweight performance-oriented tool suite for x86 multicore environments. Proceedings of PSTI2010, the First International Workshop on Parallel Software Tools and Tool Infrastructures, San Diego CA, September 13, 2010. DOI: 10.1109/ICPPW.2010.38 Preprint: <http://arxiv.org/abs/1004.4431>
11. Tutorial: Empirical Roofline Model // [github.com: электронный ресурс](https://github.com/RRZE-HPC/likwid/wiki/Tutorial:-Empirical-Roofline-Model). URL: <https://github.com/RRZE-HPC/likwid/wiki/Tutorial:-Empirical-Roofline-Model> (дата обращения: 18.08.2023)
12. Z. Cui, Y. Liang, K. Rupnow, and D. Chen, “An Accurate GPU Performance Model for Effective Control Flow Divergence Optimization,” *Proc. IEEE 26th Int’l Parallel Distributed Processing Symp. (IPDPS)*, pp. 83-94, 2012
13. W. W. L. Fung, I. Sham, G. Yuan, and T. M. Aamodt, “Dynamic Warp Formation and Scheduling for Efficient GPU Control Flow,” in *Proceedings of the 40th Annual IEEE/ACM International Symposium on Microarchitecture*, ser. MICRO 40, 2007, pp. 407–420.
14. J. Meng, D. Tarjan, and K. Skadron, “Dynamic warp subdivision for integrated branch and memory divergence tolerance,” in *Proceedings of the 37th annual international symposium on Computer architecture*, ser. ISCA ’10, 2010, pp. 235–246
15. E. Z. Zhang, Y. Jiang, Z. Guo, and X. Shen, “Streamlining GPU applications on the fly: thread divergence elimination through runtime thread-data remapping,” in *Proceedings of the 24th ACM International Conference on Supercomputing*, ser. ICS ’10, 2010, pp. 115–126.
16. CUDA C++ programming guide // [docs.nvidia.com: электронный ресурс](https://docs.nvidia.com/cuda/cuda-c-programming-guide/index.html). URL: <https://docs.nvidia.com/cuda/cuda-c-programming-guide/index.html> (дата обращения: 18.08.2023)
17. Yu, Qi & Childers, Bruce & Huang, Libo & Qian, Cheng & Wang, Zhiying. (2020). A quantitative evaluation of unified memory in GPUs. *The Journal of Supercomputing*. 76. 10.1007/s11227-019-03079-y.
18. Chien, Steven & Peng, Ivy & Markidis, Stefano. (2019). Performance Evaluation of Advanced Features in CUDA Unified Memory. 50-57. 10.1109/MCHPC49590.2019.00014. A quantitative evaluation of unified memory in GPUs Qi Yu · Bruce Childers · Libo Huang · Cheng Qian · Zhiying Wang
19. How to Access Global Memory Efficiently in CUDA C/C++ Kernels // *Nvidia technical blog: электронный ресурс*. URL: <https://developer.nvidia.com/blog/how-access-global-memory-efficiently-cuda-c-kernels/> (дата обращения: 18.08.2023)
20. QueryPerformanceCounter function – Win32 apps // *Microsoft Learn: электронный ресурс*. URL: <https://learn.microsoft.com/en-us/windows/win32/api/profileapi/nf-profileapi-queryperformancecounter> (дата обращения: 18.08.2023)
21. CUDA Pro Tip: Write Flexible Kernels with Grid-Stride Loops // *Nvidia technical blog: электронный ресурс*. URL: <https://developer.nvidia.com/blog/cuda-pro-tip-write-flexible-kernels-grid-stride-loops/> (дата обращения: 18.08.2023)

### References

1. Akritas A. G. and G. I. Malaschonok, “Applications of singular-value decomposition (SVD),” *Mathematics and Computers in Simulation*, 2004; 67:15-31,
2. Natarajan, Venkatanathan. “Singular Spectral Analysis (Ssa) of Solid Earth Tide (Set)-Implications to Identify Earthquake Precursors and Earthquakes in the Himalayan Region ( $M \geq 6$ ) During 1991-2021.” (2022).
3. Ahmadi-Asl S. et al. Randomized algorithms for computation of Tucker decomposition and higher order SVD (HOSVD), 2021; 9: 28684-28706
4. Wall M. E., Rechtsteiner A., Rocha L. M. Singular value decomposition and principal component analysis. *A practical approach to microarray data analysis*. – Boston, MA : Springer US, 2003; 91-109.
5. Hammarling S. The singular value decomposition in multivariate statistics. *ACM Signum Newsletter*. 1985;. 20(3): 2-25.
6. Amey J. L. et al. Neural network interpretation using descrambler groups. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2021; 118 (5):2016917118.
7. S. Williams, A. Waterman, and D. Patterson, “Roofline: An Insightful Visual Performance Model for

- Multicore Architectures,” *Comm. ACM*, 2009; 52( 4): 65-76,
8. H. Jia, Y. Zhang, G. Long, J. Xu, S. Yan, and Y. Li, “GPU Roofline: A Model for Guiding Performance Optimizations on GPUs,” *Proc. 18th Int’l Conf. Parallel Processing (Euro-Par ’12)*, 2012; 7484: 920-932.
  9. T. Cramer, D. Schmidl, M. Klemm, and D. an Mey, “OpenMP Programming on Intel Xeon Phi Coprocessors: An Early Performance Comparison,” *Proc. Many-Core Applications Research Community Symp. at RWTH Aachen Univ.*, 2012; 38-44.
  10. J. Treibig, G. Hager and G. Wellein: LIKWID: A lightweight performance-oriented tool suite for x86 multicore environments. *Proceedings of PSTI2010, the First International Workshop on Parallel Software Tools and Tool Infrastructures*, San Diego CA, September 13, 2010. DOI: 10.1109/ICPPW.2010.38 Preprint: <http://arxiv.org/abs/1004.4431>
  11. Tutorial: Empirical Roofline Model // [github.com: elektronnyj resurs](https://github.com/elektronnyj-resurs). URL: <https://github.com/RRZE-HPC/likwid/wiki/Tutorial:-Empirical-Roofline-Model> (data obrashcheniya: 18.08.2023)
  12. Z. Cui, Y. Liang, K. Rupnow, and D. Chen, “An Accurate GPU Performance Model for Effective Control Flow Divergence Optimization,” *Proc. IEEE 26th Int’l Parallel Distributed Processing Symp. (IPDPS)*, 2012; 83-94
  13. W. W. L. Fung, I. Sham, G. Yuan, and T. M. Aamodt, “Dynamic Warp Formation and Scheduling for Efficient GPU Control Flow,” in *Proceedings of the 40th Annual IEEE/ACM International Symposium on Microarchitecture*, ser. MICRO 40, 2007, pp. 407–420.
  14. J. Meng, D. Tarjan, and K. Skadron, “Dynamic warp subdivision for integrated branch and memory divergence tolerance,” in *Proceedings of the 37th annual international symposium on Computer architecture*, ser. ISCA ’10, 2010;. 235–246
  15. E. Z. Zhang, Y. Jiang, Z. Guo, and X. Shen, “Streamlining GPU applications on the fly: thread divergence elimination through runtime thread-data remapping,” in *Proceedings of the 24th ACM International Conference on Supercomputing*, ser. ICS ’10, 2010; 115–126.
  16. CUDA C++ programming guide // [docs.nvidia.com: elektronnyj resurs.](https://docs.nvidia.com/cuda/cuda-c-programming-guide/index.html) URL: <https://docs.nvidia.com/cuda/cuda-c-programming-guide/index.html> (data obrashcheniya: 18.08.2023)
  17. Yu, Qi & Childers, Bruce & Huang, Libo & Qian, Cheng & Wang, Zhiying. (2020). A quantitative evaluation of unified memory in GPUs. *The Journal of Supercomputing*. 76. 10.1007/s11227-019-03079-y.
  18. Chien, Steven & Peng, Ivy & Markidis, Stefano. (2019). Performance Evaluation of Advanced Features in CUDA Unified Memory. 50-57. 10.1109/MCHPC49590.2019.00014. A quantitative evaluation of unified memory in GPUs Qi Yu · Bruce Childers · Libo Huang · Cheng Qian · Zhiying Wang
  19. How to Access Global Memory Efficiently in CUDA C/C++ Kernels // Nvidia technical blog: [elektronnyj resurs.](https://developer.nvidia.com/blog/how-access-global-memory-efficiently-cuda-c-kernels/) URL: <https://developer.nvidia.com/blog/how-access-global-memory-efficiently-cuda-c-kernels/> (data obrashcheniya: 18.08.2023)
  20. QueryPerformanceCounter function – Win32 apps. Microsoft Learn: [elektronnyj resurs.](https://learn.microsoft.com/en-us/windows/win32/api/profileapi/nf-profileapi-queryperformancecounter) URL: <https://learn.microsoft.com/en-us/windows/win32/api/profileapi/nf-profileapi-queryperformancecounter> (data obrashcheniya: 18.08.2023)
  21. CUDA Pro Tip: Write Flexible Kernels with Grid-Stride Loops. Nvidia technical blog: [elektronnyj resurs.](https://developer.nvidia.com/blog/cuda-pro-tip-write-flexible-kernels-grid-stride-loops/) URL: <https://developer.nvidia.com/blog/cuda-pro-tip-write-flexible-kernels-grid-stride-loops/> (data obrashcheniya: 18.08.2023)

**Сведения об авторах:**

Безрученко Алексей Юрьевич, аспирант, [alexei.bezruchenko@yandex.ru](mailto:alexei.bezruchenko@yandex.ru)

Егунов Виталий Алексеевич, кандидат технических наук, доцент, кафедра ЭВМ и систем; [vegunov@mail.ru](mailto:vegunov@mail.ru)

**Information about the authors:**

Aleksei Yu. Bezruchenko, Postgraduate Student; [alexei.bezruchenko@yandex.ru](mailto:alexei.bezruchenko@yandex.ru)

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

**Конфликт интересов/Conflict of interest.**

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

**Поступила в редакцию/ Received 08.10.2023.**

**Одобрена после рецензирования / Reviced 20.10.2023.**

**Принята в печать /Accepted for publication 20.10.2023.**

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ**  
**INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS**

УДК 004. 093.1

DOI: 10.21822/2073-6185-2023-50-4-75-84



Оригинальная статья /Original article

**К вопросу обеспечения защищенного доступа к информационным системам с применением биометрической аутентификации на основе нечеткого образа личности пользователя и нейросетевых преобразований**

**О.И. Бокова<sup>1</sup>, С.В. Канавин<sup>2</sup>, Н.С. Хохлов<sup>2</sup>, И.В. Гилев<sup>2</sup>, Л.А. Лекарь<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>ООО «Каскад»,

<sup>1</sup>115230, г. Москва, Каширское шоссе, 17 к. 5 стр. 3, Россия,

<sup>2</sup>Воронежский институт МВД России,

<sup>2</sup>394065, г. Воронеж, пр-т. Патриотов, 53, Россия,

<sup>3</sup>Академия управления МВД России,

<sup>3</sup>125171, г. Москва, ул. Зои и Александра Космодемьянских ул., 8, Россия

**Резюме. Цель.** В современных условиях для доступа к информационным системам применяются технологии криптографической аутентификации личности, основанные на обработке биометрической информации и преобразовании биометрических образов пользователя в его персональный код доступа. Актуальным направлением исследований является применение нейросетевых технологий при организации защищенного доступа к информационным системам. Средства биометрической аутентификации могут быть отнесены к высоконадежным, только если в их состав введены криптографические механизмы аутентификации, работающие совместно с биометрическими механизмами аутентификации через преобразование биометрических образов в однозначный криптографический код доступа. В этом случае совокупность биометрических идентификаторов личности пользователя формируют его нечеткий образ, который используется в дальнейшем при проведении аутентификации. Целью исследования является разработка алгоритма обеспечения защищенного доступа к информационным системам с применением биометрической аутентификации на основе нечеткого образа личности пользователя и нейросетевых преобразований. **Метод.** Разработка алгоритма основана на использовании методов нечеткой логики и аппарата нейронных сетей. **Результат.** В работе выявлены особенности биометрической идентификации личности пользователя информационных систем. Предложен алгоритм обеспечения защищенного доступа к информационным системам с применением биометрической аутентификации на основе нечеткого образа личности пользователя и нейросетевых преобразований. **Вывод.** На основе двухэтапной аутентификации личности пользователя реализован защищенный доступ к информационным системам зарегистрированных пользователей. Приведен листинг программного кода на языке Python для создания и обучения нейронной сети классификатора биоидентификаторов. Материалы статьи представляют практическую ценность для специалистов в области обеспечения защищенного доступа к информационным системам с применением искусственного интеллекта.

**Ключевые слова:** информационная безопасность; биометрические механизмы аутентификации; биометрические идентификаторы; нейросетевая система преобразования, криптографический ключ, нейросетевая система преобразования биометрических идентификаторов

**Для цитирования:** О.И. Бокова, С.В. Канавин, Н.С. Хохлов, И.В. Гилев, Л.А. Лекарь. К вопросу обеспечения защищенного доступа к информационным системам с применением биометрической аутентификации на основе нечеткого образа личности пользователя и нейросетевых преобразований. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023; 50(4):75-84. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-4-75-84

## On the issue of ensuring secure access to information systems using biometric authentication based on a fuzzy image of the user's identity and neural network transformations

O.I. Bokova<sup>1</sup>, S.V. Kanavin<sup>2</sup>, N.S. Khokhlov<sup>2</sup>, I.V. Gilev<sup>2</sup>, L.A. Lekar<sup>3</sup>

<sup>1</sup>LLC «Cascade»,

<sup>1</sup>17 Kashirskoe highway, k. 5 building 3, Moscow 115230, Russia,

<sup>2</sup>Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia,

<sup>2</sup>53 Patriotov Ave., Voronezh 394065, Russia,

<sup>3</sup>Academy of Management of the Ministry of Internal Affairs of Russia,

<sup>3</sup>8 Zoe and Alexandra Kosmodemyanskikh St., Moscow 125171, Russia

**Abstract. Objective.** In modern conditions, cryptographic personal authentication technologies are used to access information systems, based on processing biometric information and converting the user's biometric images into his personal access code. A current area of research is the use of neural network technologies in organizing secure access to information systems. Biometric authentication tools can be classified as highly reliable only if they include cryptographic authentication mechanisms that work together with biometric authentication mechanisms through the conversion of biometric images into a unique cryptographic access code; in this case, a set of biometric identifiers of the user's identity form his fuzzy image, which is used later during authentication. The purpose of the study is to develop an algorithm for providing secure access to information systems using biometric authentication based on a fuzzy image of the user's identity and neural network transformations. **Method.** The development of the algorithm is based on the use of fuzzy logic methods and neural networks. **Result.** The work reveals the features of biometric identification of the user of information systems. An algorithm is proposed for providing secure access to information systems using biometric authentication based on a fuzzy image of the user's personality and neural network transformations. **Conclusions.** Based on two-step authentication of the user's identity, secure access to the information systems of registered users is implemented. A listing of the program code in Python for creating and training a neural network of a biointentifier classifier is provided. The materials of the article are of practical value for specialists in the field of providing secure access to information systems using artificial intelligence.

**Keywords:** information security; biometric authentication mechanisms; biometric identifiers; neural network transformation system, cryptographic key, neural network transformation system for biometric identifiers

**For citation:** O.I. Bokova, S.V. Kanavin, N.S. Khokhlov, I.V. Gilev, L.A. Lekar. On the issue of ensuring secure access to information systems using biometric authentication based on a fuzzy image of the user's identity and neural network transformations. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2023; 50(4):75-84. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-4-75-84

**Введение.** В соответствии с определением из ГОСТ Р-58833-2020 под термином аутентификация понимаются действия по проверке подлинности субъекта и/или объекта доступа, а также проверки принадлежности субъекту доступа и/или объекту доступа предъявленного идентификатора доступа и аутентификационной информации. В качестве идентификатора доступа или аутентификационной информации при входе в информационную систему могут применяться биометрические персональные данные – сведения которые характеризуют физиологические и биологические особенности человека, на основании которых можно установить его личность. Согласно приведенной терминологии, системе необходимо убедиться в предоставлении пользователем данных.

Воспроизводство любых заранее заданных кодов (ключей, паролей, слов и т.д.) возможно из биометрических данных без их сохранения. На настоящий момент апробированы или имеют перспективы широкого практического использования в соответствии с ГОСТ Р-52633.0-2006 следующие биометрические механизмы:

– анализ кровеносных сосудов глазного дна;

- анализ радужной оболочки глаза;
- двухмерный и трехмерный анализы геометрических особенностей лица в видимом и инфракрасном спектрах света;
- анализ особенностей геометрии ушных раковин;
- анализ особенностей голоса;
- анализ особенностей папиллярных рисунков пальцев;
- анализ геометрии ладони, включая рисунки складок кожи ладони и папиллярные рисунки различных фрагментов кожи ладони;
- анализ рисунка кровеносных сосудов, складок кожи тыльной стороны ладони и т.д.

С учетом результатов анализа мирового рынка биометрических систем следует отметить ежегодный рост практики применения биометрических систем в разных отраслях науки и техники. Приведенная на рис. 1 диаграмма использования биометрических данных показывает рост таких идентификационных признаков как двухмерный и трехмерный анализы геометрических особенностей лица, анализ радужной оболочки глаза.

В 2016 году Techportal.ru опубликовал прогноз развития структуры биометрических идентификационных признаков на 2020 год по сравнению с 2014 годом. Из приведенной на рис. 1 диаграммы можно сделать выводы о том, что кроме идентификации личности по отпечаткам пальцев все большее распространение получают системы, использующие в качестве биометрических идентификаторов лицо, радужную оболочку глаз, голос, вены и др.

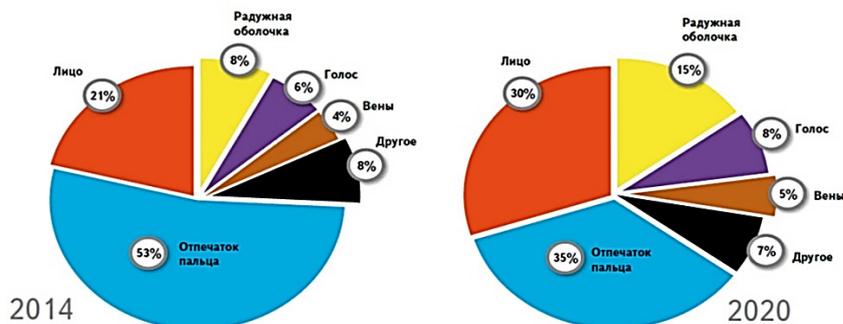


Рис. 1. Диаграмма статистики использования биометрических данных

Fig. 1. Diagram of statistics on the use of biometric data

Каждый из перечисленных выше механизмов биометрической аутентификации способен давать свой уникальный биометрический образ легального пользователя – образ «Свой». Биометрический образ злоумышленника, пытающегося преодолеть биометрическую защиту, формирует образ «Чужой». Важным для систем с биометрической аутентификацией является то, чтобы биометрические данные не должны сохраняться. Воспроизводство любых заранее заданных кодов (ключей, паролей, слов и т.д.) осуществляется из биометрических данных без их сохранения.

Вопросам обеспечения биометрической многофакторной аутентификации посвящены научные работы [1-6]. С.А. Мишин рассматривает применение искусственного интеллекта для ведения базы данных элементов внешности человека [1]. Т.И. Лапина и др. для управления доступом к информационным ресурсам в информационных системах рассматривает подход многофакторной аутентификации и анализа биометрических данных [2-4]. Е.А. Сулавко и др. для комплексирования независимых биометрических признаков при распознавании субъектов применяет подход на основе сетей квадратичных форм, перцептронов и меры хи-модуль [3]. В работе [6] уделено внимание проекту третьего национального стандарта России по быстрому автоматическому обучению больших сетей корреляционных нейронов на малых обучающих выборках биометрических данных. Проведенный анализ работ показывает, что представленные в них способы управления доступом к информационным системам, технологии, модели, методы аутентификации используются для решения прикладных задач в своих предметных областях. Вопросы обеспечения комплексной безопасности информации отражены не в полном объеме и требуют более детальной проработки.

С учетом проведенного сравнительного анализа существующих технологий аутентификации по факторам аутентификации можно выделить следующие недостатки. При аутентификации паролями или токенами недостатком будет являться отсутствие связи с физиологическими особенностями оператора. Для биометрических факторов аутентификации недостатком будет выступать возможность сохранения биометрической информации в базах данных и в случае их кражи последствия нейтрализовать невозможно [7]. К другим недостаткам аутентификации можно отнести тот факт, что она проводится только при входе в систему и отвлекает оператора от выполнения своих функций.

Для совершенствования процедуры аутентификации при входе в информационную систему можно рассмотреть следующие варианты: использовать сложные пароли, которые практически невозможно запомнить; воспроизводить сложные пароли с помощью биометрических данных оператора в сочетании с простыми паролями, например с PIN – кодом; воспроизводить сложные пароли без отвлечения оператора с помощью с помощью биометрических данных оператора по двум биометрическим параметрам: лицо и вены. Сканер вен встраивать в мышку. В качестве примеров реализации информационных систем, где используется биометрическая идентификация, можно привести следующие:

- программные библиотеки для аутентификации по лицу, работающие под ОС Windows, Linux, Android, iOS;
- приложение «Биосейф» под ОС Android;
- национальная система платежных карт (НСПК) «МИР»;
- приложение «Электронный кошелек» под Android и iOS;
- библиотеки для внедрения в приложение «Сбербанк онлайн» и другие приложения;
- библиотеки для внедрения в приложение «Персональный медицинский помощник» и в другие медицинские системы.

Рассмотрим возможные области применения защищенного доступа к информационным системам с применением биометрической аутентификации и нейросетевых преобразований в интересах МВД России. Развитие данного направления позволит усовершенствовать процедуру аутентификации пользователей при входе в систему как непосредственно, так и дистанционно в момент управления процессом.

В этом случае процедура аутентификации может носить неотвлекающий характер и может проводиться по лицу или венам. Электронные удостоверения личности сотрудников для аутентификации не требуют физических носителей. Документы хранятся в центре обработки данных или в персональных мобильных устройствах. Биометрические данные и ключи шифрования нигде не хранятся. Также биометрическая идентификация может применяться в сфере электронной подписи. В этом случае имеется непосредственная связь электронной подписи с физиологическими особенностями владельца и отсутствует сам физический носитель ключа. Даная технология и ее реализация будет приведена далее.

**Постановка задачи.** Целью исследования является разработка алгоритма обеспечения защищенного доступа к информационным системам с применением биометрической аутентификации на основе нечеткого образа личности пользователя и нейросетевых преобразований.

**Методы исследования.** Технология Биометрия – Нейронные сети – Криптография (БНК) в настоящее время применяется для обеспечения защищенного доступа к информационным системам с применением биометрической аутентификации. Объектом защиты в случае применения технологии БНК являются номера связей и весовые коэффициенты искусственной нейронной сети преобразователя «биометрия – код», хранимые в нейросетевом биометрическом контейнере [8]. После того как нейронная сеть преобразователя «биометрия – код» обучена в соответствии с ГОСТ Р 52633. 5, каждый ее нейрон может быть представлен двумя таблицами (таблицей связей и таблицей весовых коэффициентов) [9]. Эта ситуация отображена на рис. 2.

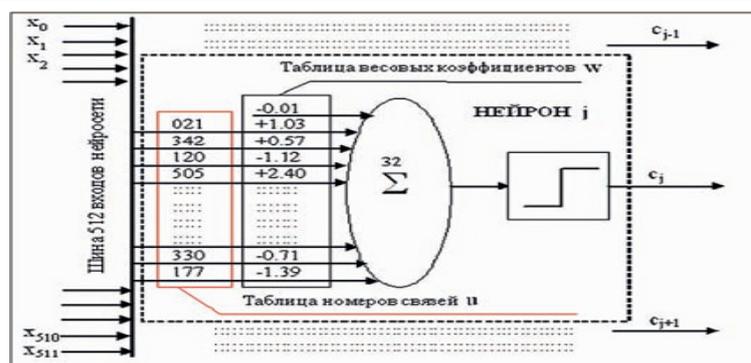


Рис. 2. Пример фрагмента структуры искусственной нейронной сети  
 Fig. 2. Example of a fragment of the structure of an artificial neural network

Описание технологии приведено в технической спецификации ТК 26 «Защита нейросетевых биометрических контейнеров с использованием криптографических алгоритмов» и регламентируется серией документов ГОСТ Р 52633. Меры противодействия атакам по извлечению ключа из биометрического контейнера рассмотрены в технической спецификации №ТС 26.2.002-2020 технического комитета ТК 26 («Криптографическая защита информации»). В этом же документе приведена методика оценки стойкости нейронной сети к атакам извлечения ключа. Следует отметить, что методика не позволяет рассчитать требуемую стойкость, она позволяет оценить лишь нижнюю границу стойкости. Реальные показатели стойкости всегда будут выше указанных граничных значений.

Процедура оценки стойкости занимает несколько секунд и осуществляется сразу после обучения нейронной сети. Результат оценки сообщается оператору – владельцу биометрических данных для принятия решения [10]. Если по мнению владельца стойкость недостаточна, то он должен либо отказаться от использования технологии, либо принять меры по увеличению стойкости – дополнительно использовать жесты, пароль, токен и т.д. [11, 12]. Принцип работы «широкой» нейронной сети приведен на рис. 3.

«Широкая» нейронная сеть реализует формулу:  $A+B=C$ , где  $A$  – персональные биометрические признаки владельца пароля  $\pm \Delta$ ,  $\Delta$  – нестабильность биометрических данных  $B$  – контейнер – коэффициенты нейронной сети  $C$  – пароль или ключ шифрования секретов. В базе данных хранится только слагаемое  $B$ .



Рис. 3. Принцип работы «широкой» нейронной сети  
 Fig. 3. Operating principle of a «wide» neural network

По сути,  $B$  – это половина пароля. Вторая половина – это биометрические данные владельца. Зная только  $B$ , нельзя вычислить ни  $C$ , ни  $A$ . Классификация по персональным биометрическим признакам «Свой» – «Чужой» приведена на рис. 4.

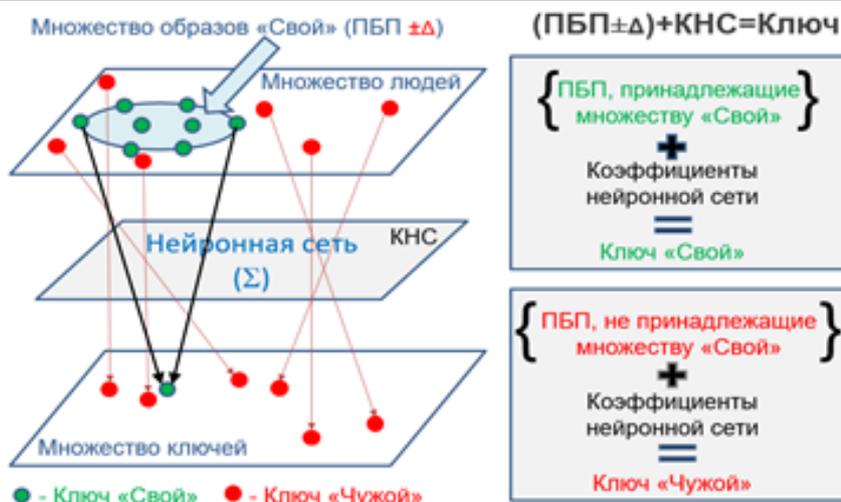


Рис. 4. Классификация по персональным биометрическим признакам «Свой» – «Чужой»

Fig. 4. Classification according to personal biometric characteristics «Own» – «Alien»

Обучение «широкой» нейронной сети является сложным процессом, но с правильным подходом и методами можно достичь хороших результатов. Алгоритм обучения «широкой» нейронной сети приведен на рис. 5.



Рис. 5. Обучение «широкой» нейронной сети

Fig. 5. Training a «wide» neural network

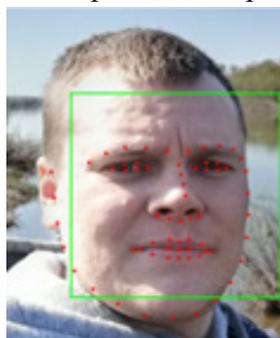
**Обсуждение результатов.** Рассмотренный алгоритм аутентификации при использовании биоидентификаторов не лишен недостатков, один из которых выражается в избыточности выполняемых вычислительных операций за счет вычисления криптографических ключей и определения на их основании близости образов. Авторами предлагается не вычислять сумму  $S$  для каждого предъявляемого образа, а осуществлять проверку на подлинность с применением в составе системы дополнительной нейронной сети, классифицирующей образы на «Свой» – «Чужой» на основе вычисления нечеткого образа личности пользователя. Если образ классифицирован как «Чужой» для него нет необходимости вычислять сумму  $S$ . В этом случае будет реализована двухэтапная аутентификация, что позволит обеспечить защищенный доступ к информационным системам зарегистрированных пользователей. Подробнее данный алгоритм будет рассмотрен в следующем разделе

**Алгоритм обеспечения защищенного доступа к информационным системам с применением биометрической аутентификации на основе нечеткого образа личности пользователя и нейросетевых преобразований.** Авторами предлагается в качестве первого

этапа работы алгоритма аутентификации составление нечеткого образа личности на основе следующих биоидентификаторов:

1. «Геометрических особенностей лица»;
2. «Особенностей геометрии ушных раковин»;
3. «Особенностей голоса»;
4. «Особенности папиллярных рисунков пальцев».

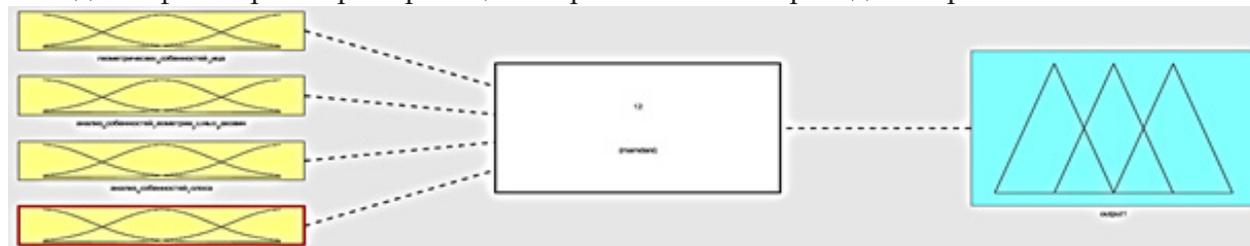
Пример составления нечеткого образа лица представлен на рис. 6.



**Рис. 6. Пример анализа биоидентификатора «Геометрические особенности лица»**

**Fig. 6. Example of analysis of the bioidentifier «Geometric facial features»**

Рис. 6 иллюстрирует пример составления нечеткого образа с учетом геометрии лица. Нечеткий образ каждого человека будет иметь свое уникальное расположение точек на овале лица, а также характеризоваться определенным расстоянием между ними. По аналогии с нечетким образом человека по особенностям лица составляются его образы и по другим трем идентификаторам. Общий нечеткий образ личности составляется из суммы ее четырех биоидентификаторов. Пример общего образа личности приведен на рис. 7.



**Рис. 7. Пример нечеткого образа личности**

**Fig. 7. Example of a fuzzy personality image**

Для создания нейронной сети, осуществляющей классификацию биоидентификаторов на соответствие образу возможно разделить на следующие этапы:

1. Сбор данных. Сбор достаточного количества примеров биоидентификаторов, которые нужно классифицировать. Например, для отпечатков пальцев, понадобятся изображения отпечатков пальцев разных людей.

2. Подготовка данных. Обработка данных для удобства работы с ними. Например, для изображений отпечатков пальцев, можно применить методы обработки изображений, чтобы нормализовать размеры и улучшить качество изображений.

3. Создание модели нейронной сети. Определение архитектуры нейронной сети. В зависимости от типа биоидентификатора, вы можете использовать различные архитектуры нейронных сетей, такие как сверточные нейронные сети (CNN) для изображений или рекуррентные нейронные сети (RNN) для голосовых данных.

4. Обучение модели. Используйте подготовленные данные для обучения нейронной сети. Разделите данные на обучающую и тестовую выборки. Затем обучите модель на обучающей выборке, настраивая веса и параметры сети с помощью метода обратного распространения ошибки.

5. Оценка модели. После обучения оцените производительность модели на тестовой выборке. Используйте метрики, такие как точность, полноту, F1-меру и матрицу ошибок,

чтобы измерить качество классификации.

6. Тестирование модели. После успешной оценки модели, протестируйте ее на новых данных, чтобы убедиться в ее работоспособности.

7. Настройка и улучшение. В случае неудовлетворительных результатов можно провести дополнительные итерации обучения, изменить архитектуру сети или внести другие изменения для улучшения производительности модели.

Соответствие предъявленного идентификатора личности определяется на основании нечетких оценок, выставляемых каждому из составляющих образа нейронной сетью. На основании данных оценок нейронная сеть принимает решение о соответствии идентификаторов нечеткому образу личности и соответствия самого образа, основанного на суммарной оценке совокупности трех идентификаторов, при этом характеризуя их следующими состояниями: соответствует полностью, не соответствует или соответствует частично. При этом показатель стабильности биометрического параметра вычисляется по формуле  $A(v_i) = \frac{v_{\text{Чужой}}(v_i)}{v_{\text{Свой}}(v_i)}$  где  $v_{\text{Чужой}}(v_i)$  – стандартное отклонение  $i$ -го биометрического параметра множества образов «Чужой»;  $v_{\text{Свой}}(v_i)$  – стандартное отклонение  $i$ -го биометрического параметра множества образов «Свой».

Следует отметить, что решения принимаются нейронной сетью на основе нечетких правил и основанных на них базы знаний. Пример определения принадлежности идентификатора представлен на рис. 8.

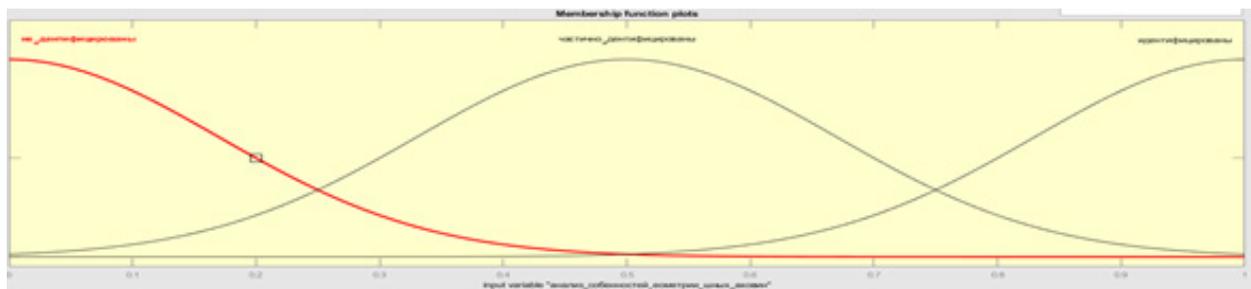


Рис. 8. Пример нечеткого идентификатора личности «Особенностей геометрии ушных раковин»

Fig. 8. Example of a fuzzy personal identifier «Features of the geometry of the auricles»

Ниже приведен листинг программного кода на языке Python для создания и обучения нейронной сети классификатора биоидентификаторов с использованием библиотеки TensorFlow:

```
``python
import tensorflow as tf
from tensorflow.keras import layers
# Загрузка и предобработка данных
# Пример загрузки и предобработки данных отпечатков пальцев
# Загрузка данных
train_data, train_labels = load_fingerprint_data('train_data.csv')
test_data, test_labels = load_fingerprint_data('test_data.csv')
# Предобработка данных
train_data = preprocess_fingerprint_data(train_data)
test_data = preprocess_fingerprint_data(test_data)
# Определение архитектуры нейронной сети
model = tf.keras.Sequential([
    layers.Dense(64, activation='relu', input_shape=(input_size,)),
    layers.Dense(64, activation='relu'),
    layers.Dense(num_classes, activation='softmax')
])
# Компиляция модели
model.compile(optimizer='adam',
              loss=tf.keras.losses.SparseCategoricalCrossentropy(from_logits=True),
              metrics=['accuracy'])
# Обучение модели
```

```
model.fit(train_data, train_labels, epochs=10, batch_size=32, validation_data=(test_data, test_labels))
# Оценка модели
test_loss, test_acc = model.evaluate(test_data, test_labels, verbose=2)
print('Test accuracy:', test_acc)
# Прогнозирование классов для новых данных
predictions = model.predict(new_data)
```

В приведенном программном коде реализована полносвязная нейронная сеть с двумя скрытыми слоями, активацией ReLU и выходным слоем с функцией активации softmax для классификации. Модель компилируется с оптимизатором Adam и функцией потерь SparseCategoricalCrossentropy. Модель обучается на обучающих данных в течение 10 эпох с размером пакета 32. После обучения модель оценивается на тестовых данных и определяется точность классификации на тестовом наборе биоидентификаторов личности. Далее работа алгоритма производится в соответствии с рассмотренными ранее шагами. Примерами применения таких систем являются доступ к различного рода базам данных, оперативное управление при принятии важных решений, а также системы управления вооружением, что сокращает временные и материальные затраты на сбор информации, при этом обеспечивается оперативность проверки и установления личности гражданина.

**Вывод.** В работе выявлены особенности биометрической идентификации личности пользователя информационных систем. Предложен алгоритм обеспечения защищенного доступа к информационным системам с применением биометрической аутентификации на основе нечеткого образа личности пользователя и нейросетевых преобразований.

Авторами предлагается не вычислять сумму  $C$  для каждого предъявляемого образа, а осуществлять проверку на подлинность с применением в составе системы дополнительной нейронной сети, классифицирующей образы на «Свой» – «Чужой» на основе вычисления нечеткого образа личности пользователя. Если образ классифицирован как «Чужой» для него нет необходимости вычислять сумму  $C$ .

В этом случае будет реализована двухэтапная аутентификация, что позволит обеспечить защищенный доступ к информационным системам зарегистрированных пользователей. Приведен пример программного кода на языке Python для создания и обучения нейронной сети классификатора биоидентификаторов с использованием библиотеки TensorFlow. Материалы статьи представляют практическую ценность для специалистов в области обеспечения защищенного доступа к информационным системам с применением искусственного интеллекта.

#### Библиографический список:

1. Рутковская Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Д. Рутковская, М. Иванов А.И., Фунтиков В.А., Ефимов О.В. Нейросетевая защита биометрических данных пользователя, а также его личного криптографического ключа при локальной и дистанционной аутентификации. Вопросы защиты информации. 2008. – С. 25–27.
2. Чуйков А.В., Вульфин А.М., Васильев В.И. Нейросетевая система преобразования биометрических признаков пользователя в криптографический ключ. Доклады ТУСУР. 2018. – С. 35–41.
3. Волчихин В.И., Иванов А.И., Фунтиков В.А., Малыгина Е.А. Перспективы использования искусственных нейронных сетей с многоуровневыми квантователями в технологии биометрико-нейросетевой аутентификации. Известия высших заведений. Поволжский регион. 2013. – С. 86–96.
4. Мишин С.А., Мишин А.В. Применение технологий искусственного интеллекта для ведения базы данных элементов внешности человека. Вестник Воронежского института МВД России. 2022. – С. 87–96.
5. Лапина Т.И., Димов Э.М., Петрик Е.А., Лапин Д.В. Управление доступом к информационным ресурсам в информационных системах. Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2018; 6(4). DOI:10.26102/2310-6018/2018.23.4.039 URL:[https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2018/10/LapinaSoavtors\\_4\\_18\\_3.pdf](https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2018/10/LapinaSoavtors_4_18_3.pdf).
6. Сулавко А.Е., Еременко А.В., Толкачева Е.В., Борисов Р.В. Комплексование независимых биометрических признаков при распознавании субъектов на основе сетей квадратичных форм, персептронов и меры хи-модуль. Информационно-управляющие системы. 2017. – С.50–62.
7. Исмагилов Р.Ф., Лушников Н.Д., Исмагилова А.С. Конструирование модели обучающей нейронной сети для биометрической многофакторной аутентификации пользователя информационной системы. Вопросы защиты информации. 2023. – С.19–23.
8. Иванов А.И., Сулавко А.Е. Проект третьего национального стандарта России по быстрому автоматическому обучению больших сетей корреляционных нейронов на малых обучающих выборках биометрических данных. Вопросы кибербезопасности. 2021. – С.84–93.

9. Еременко А.В., Сулавко А.Е., Толкачева Е.В., Левитская Е.А. Метод защиты текстовых документов на электронных и бумажных носителях на основе скрытого биометрического идентификатора субъекта, получаемого из подписи. *Инфокоммуникационные технологии*. 2016. – С.628–634.
10. Метод многофакторной аутентификации: обеспечение информационной безопасности в инновационных системах Лазарев А.И., Заенчковский А.Э., Халин В.Г., Масютин С.А. *Экономика и предпринимательство*. 2022. – С.1086–1090.
11. Хорев П.Б. Многофакторная аутентификация пользователей при удаленном доступе к информационным системам *Информационно-технологический вестник*. –2022. – С.20–25.
12. Silasai, O.; Khowfa, W. The Study on Using Biometric Authentication on Mobile Device. *NU Int. J. Sci.* 2020. – pp.90–110.

#### References

1. Rutkovskaya D. Neural networks, genetic algorithms and fuzzy systems / D. Rutkovskaya, M. Ivanov A.I., Funtikov V.A., Efimov O.V. Neural network protection of the user's biometric data, as well as his personal cryptographic key during local and remote authentication. *Information security issues*. 2008; 25–27. (In Russ)
2. Chuikov A.V., Vulfin A.M., Vasiliev V.I. A neural network system for converting user biometric characteristics into a cryptographic key. *TUSUR reports*. 2018; 35–41. (In Russ)
3. Volchikhin V.I., Ivanov A.I., Funtikov V.A., Malygina E.A. Prospects for the use of artificial neural networks with multi-level quantizers in biometric-neural network authentication technology. *News of higher institutions. Volga region*. 2013; 86–96. (In Russ)
4. Mishin S.A., Mishin A.V. Application of artificial intelligence technologies to maintain a database of elements of human appearance. *Bulletin of the Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia*. 2022; 87–96. (In Russ)
5. Lapina T.I., Dimov E.M., Petrik E.A., Lapin D.V. Controlling access to information resources in information systems. *Modeling, optimization and information technology*. 2018;6(4). DOI: 10.26102/2310-6018/2018.23.4.039 7. URL: [https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2018/10/LapinaSoavtors\\_4\\_18\\_3.pdf](https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2018/10/LapinaSoavtors_4_18_3.pdf). (In Russ)
6. Sulavko A.E., Eremenko A.V., Tolkacheva E.V., Borisov R.V. Integration of independent biometric features in subject recognition based on networks of quadratic forms, perceptrons and chi-modulus measures. *Information and control systems*. 2017; 50–62. (In Russ)
7. Ismagilov R.F., Lushnikov N.D., Ismagilova A.S. Construction of a training neural network model for biometric multi-factor authentication of an information system user. *Information security issues*. 2023;19–23. (In Russ)
8. Ivanov A.I., Sulavko A.E. Project of the third Russian national standard for fast automatic training of large networks of correlation neurons on small training samples of biometric data. *Cybersecurity issues*. 2021;84–93. (In Russ)
9. Eremenko A.V., Sulavko A.E., Tolkacheva E.V., Levitskaya E.A. A method for protecting text documents on electronic and paper media based on a hidden biometric identifier of a subject obtained from a signature. *Infocommunication technologies*. 2016; 628–634. (In Russ)
10. Multi-factor authentication method: ensuring information security in innovative systems Lazarev A.I., Zaenchkovsky A.E., Khalin V.G., Masyutin S.A. *Economics and entrepreneurship*. 2022;1086–1090. (In Russ)
11. Khorev P.B. Multi-factor user authentication for remote access to information systems *Information and Technology Bulletin*. 2022; 20–25. (In Russ)
12. Silasai, O.; Khowfa, W. The Study on Using Biometric Authentication on Mobile Device. *NU Int. J. Sci.* 2020; 90–110.

#### Сведения об авторах:

Бокова Оксана Игоревна, доктор технических наук, профессор, o.i.bokova@gmail.com.

Канавин Сергей Владимирович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры инфокоммуникационных систем и технологий, sergejj-kanavin@rambler.ru; ORCID: 0000-0003-0575-2773

Хохлов Николай Степанович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры инфокоммуникационных систем и технологий, nikolayhohlov@rambler.ru.

Гилев Игорь Владимирович, преподаватель кафедры инфокоммуникационных систем и технологий, gileviv@bk.ru.

Лекарь Людмила Антоновна, кандидат технических наук, доцент кафедры информационных технологий, antonna47@bk.ru.

#### Information about authors:

Oksana I. Bokova, Dr. Sci. (Eng.), Prof., o.i.bokova@gmail.com.

Sergey V. Kanavin, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Assoc. Prof., of the Department of Infocommunication Systems and Technologies, sergejj-kanavin@rambler.ru; ORCID: 0000-0003-0575-2773

Nikolay S. Khokhlov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Prof., of the Department of Infocommunication Systems and Technologies, nikolayhohlov@rambler.ru.

Igor V. Gilev, Lecturer, Department of infocommunication systems and technologies, gileviv@bk.ru.

Lyudmila A. Lekar, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Department of Information Technologies, antonna47@bk.ru.

#### Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/ Received 18.10.2023.

Одобрена после рецензирования / Revided 01.11.2023.

Принята в печать /Accepted for publication 01.11.2023.

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ**  
**INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS**

УДК 004.056

DOI: 10.21822/2073-6185-2023-50-4-85-92



Оригинальная статья /Original article

**Способы оценки уровня защищенности программного обеспечения  
автоматизированных систем органов внутренних дел и направления их  
совершенствования**

**И.Г. Дровникова, А.Д. Попова**

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

**Резюме. Цель.** Целью статьи является анализ существующих способов и процедур, используемых для оценивания уровня защищенности программного обеспечения автоматизированных систем, на основе исследования научной литературы, международных и отраслевых стандартов РФ по информационной безопасности автоматизированных систем, руководящих и методических документов Федеральной службы по техническому и экспортному контролю России, а также ведомственных приказов по вопросам защиты информации от несанкционированного доступа на объектах информатизации органов внутренних дел. **Метод.** Для достижения поставленной цели использован метод системного анализа подходов, применяемых при оценивании уровня защищенности программного обеспечения в автоматизированных системах. **Результат.** Представлены результаты анализа основных подходов к оцениванию уровня защищенности программного обеспечения в автоматизированных системах. Обоснована целесообразность объединения рассмотренных подходов для проведения количественной оценки уровня защищенности программного обеспечения на объектах информатизации органов внутренних дел в режиме реального времени с учетом уязвимостей в используемых программных средствах. **Вывод.** Полученные результаты могут быть использованы для формирования показателей уровня защищенности программного обеспечения в автоматизированных системах органов внутренних дел и разработки методики их расчета с учетом фактора времени.

**Ключевые слова:** автоматизированная система, программное обеспечение, уязвимость, критичность уязвимости, уровень защищенности, оценка уровня защищенности

**Для цитирования:** И.Г. Дровникова, А.Д. Попова. 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. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-4-85-92

**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**

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

**Abstract. Objective.** The purpose of the article is to analyze existing methods and procedures used to assess the level of software security of automated systems, based on a study of scientific literature, international and industry standards of the Russian Federation on information security of automated systems, guidelines and methodological documents of the Federal Service for Technical and Export Control Russia, as well as departmental orders on the protection of information from unauthorized access at informatization facilities of internal affairs bodies. **Method.** To achieve this goal, the method of system analysis of approaches used in assessing the level of software security in automated systems was used. **Result.** The results of an analysis of the main approaches

to assessing the level of software security in automated systems are presented. The expediency of combining the considered approaches to carry out a quantitative assessment of the level of software security at informatization facilities of internal affairs bodies in real time, taking into account vulnerabilities in the software used, is substantiated. **Conclusion.** The results obtained can be used to generate indicators of the level of software security in automated systems of internal affairs bodies and to develop methods for their calculation taking into account the time factor.

**Keywords:** automated system, software, vulnerability, vulnerability criticality, security level, security level assessment

**For citation:** I.G. Drovnikova, A.D. Popova. Methods for assessing the level of security of software of automated systems of internal affairs bodies and directions for their improvement. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2023; 50(4):85-92. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-4-85-92

**Введение.** Заметной тенденцией последних лет в сфере информатизации органов внутренних дел (ОВД) является возрастание числа угроз безопасности информации (БИ), реализуемых посредством несанкционированного доступа (НСД) к информационным ресурсам автоматизированных систем (АС) путем эксплуатации уязвимостей в используемом программном обеспечении (ПО). Это подвергает служебную информацию ограниченного распространения, хранящуюся и обрабатываемую в АС ОВД, нарушению ее конфиденциальности, целостности или доступности.

Основные причины, обуславливающие данную тенденцию, целесообразно объединить в два блока:

1) увеличение количества обрабатываемой служебной информации ограниченного распространения, расширение ее номенклатуры, усложнение технологического цикла обработки и др. влекут за собой разнообразие и усложнение и программных средств, используемых на современных объектах информатизации правоохранительных органов, необходимых для удовлетворения возрастающих потребностей ОВД. Это, в свою очередь, приводит к росту числа потенциальных уязвимостей в ПО и, следовательно, – к необходимости решения задачи повышения уровня защищенности используемых программных средств;

2) действующие нормативные правовые акты, регламентирующие требования к защите информации (ЗИ) в современных АС ОВД, не учитывают, как вновь появляющиеся разновидности потенциально опасных уязвимостей в ПО, так и расширяющиеся возможности угроз БИ по эксплуатации уже известных уязвимостей. Это приводит к необходимости доработки имеющихся нормативных правовых актов по ЗИ на объектах информатизации ОВД в направлении проведения оценки уровня защищенности используемого ПО с учетом его уязвимостей для выбора безопасной версии ПО в соответствии с требованиями современной международной и отечественной нормативной документации, регламентирующей разработку и эксплуатацию АС, а также приказов МВД России.

**Постановка задачи.** На основе вышеизложенного актуальной задачей является не только выявление, классификация и анализ неустранимых (текущих) уязвимостей в компонентах ПО современных АС ОВД с точки зрения их критичности с учетом фактора времени, но также изучение существующих способов и процедур оценки уровня защищенности ПО АС с целью определения направлений их совершенствования применительно к объектам информатизации ОВД с учетом уязвимостей в используемом ПО.

Результаты проведенного анализа послужат основой для определения системы показателей и разработки методики количественной оценки уровня защищенности ПО в АС ОВД в режиме реального времени, а также формирования предложений по их использованию для оптимизации версионного выбора ПО при разработке нормативно-правовой документации, связанной с обеспечением безопасности информационных технологий на объектах информатизации ОВД [1–7].

**Методы исследования.** Методологической основой исследования является системный

анализ подходов, применяемых при оценивании уровня защищенности ПО, используемого на объектах информатизации. Согласно [8] защищенность (security) ПО рассматривается как одна из подхарактеристик функциональных возможностей (functionality), которые, в свою очередь, являются характеристикой качества (quality) ПО. В соответствии с [9] защищенность ПО – это совокупность свойств ПО, характеризующая его способность предотвращать НСД, случайный или преднамеренный, к программам и данным, а также степень удобства и полноты обнаружения результатов такого доступа или действий по разрушению программ и данных. Следовательно, уровень защищенности ПО в АС ОВД может быть оценен не только относительно совокупности тех задач, выполняемых ее ПО, которые заранее определены и декларированы для конкретной системы, но и относительно всего комплекса сформулированных для нее задач. При оценивании уровня защищенности ПО в настоящее время на практике применяются четыре основных подхода, позволяющие лишь частично устранить обозначенную условность, однако ни один из подходов не позволяет ее устранить в полной мере, что можно объяснить относительностью, присущей самому понятию «защищенность» [8, 9].

**Обсуждение результатов.** В табл. 1 представлены результаты анализа четырех наиболее популярных подходов (оценочного, экспертно-балльного, расчетного, вероятностного), используемых в настоящее время при оценивании уровня защищенности ПО в АС, которые позволяют констатировать отсутствие среди авторов единства в способах их реализации.

**Таблица 1. Основные подходы, используемые при оценивании уровня защищенности ПО в АС**  
**Table 1. Main approaches used in assessing the level of software security in an automated system**

№ п/п	Характеристика подхода Characteristics of the approach	Способ реализации подхода How to implement the approach
1	Оценочный – основан на установлении соответствия уровня защищенности ПО в АС сформулированным требованиям Estimated – based on establishing compliance of the software security level in the AS with those formulated requirements	Требования по защищенности ПО формулируются в виде перечня механизмов ЗИ, которые должны быть реализованы в ПО для соответствия использующей его АС определенному уровню (классу) защищенности [10, 11] Requirements for software security are formulated in the form of a list of security mechanisms Требования по защищенности ПО формулируются в виде перечня функций, которые должны реализоваться ПО для достижения определенного уровня (класса) защищенности информации в АС, использующей данное ПО [12, 13] Software security requirements are formulated as a list of functions
2	Экспертно-балльный – основан на сочетании экспертного и балльного (табличного) методов оценки Expert-scoring – based on a combination of expert and scoring (tabular) assessment methods	Результаты опроса специалистов-экспертов обрабатываются и представляются в формате балльной оценки, которая интерпретируется в виде суждений об уровне защищенности ПО в АС [14–16] The results of the survey of expert specialists are processed and presented in a scoring format, which is interpreted in the form of judgments about the level of software security in the AS
3	Расчетный – основан на анализе ПО в АС на критичность уязвимостей Calculated - based on analysis of software in the AS for criticality vulnerabilities	На основе определения показателей критичности известных уязвимостей в компонентах ПО рассчитывается вероятность неэксплуатации их нарушителем, интерпретируемая в виде суждений об уровне защищенности ПО в АС [17–19] Calculated the probability of non-exploitation by the violator, interpreted in the form of judgments about the level of software security in the AS [17–19]
4	Вероятностный – основан на математическом моделировании процесса функционирования ПО в АС Probabilistic – based on mathematical modeling of the functioning process Software in AS	Для оценивания защищенности ПО в АС используются математические методы и модели, с помощью которых определяются соответствующие показатели и критерии [14, 15, 20–22, 24] Mathematical methods and models are used

Сущность *первого подхода (оценочного)* заключается в формировании требований по защищенности ПО в АС, выполнение которых будет свидетельствовать о безопасности используемых программных средств [10–13]. Целью обеспечения безопасности ПО, используемого в АС, при этом станет выполнение условий, позволяющих достигнуть сформулированных требований. В этом случае уровень защищенности ПО следует рассматривать как меру приближения к заданным условиям.

Оценочный подход может быть реализован в двух вариантах, но наиболее популярным в настоящее время является его «функциональный» вариант. В соответствии с ним требования по защищенности ПО в АС формулируются в виде перечня функций, реализация которых ПО необходима для достижения требуемого уровня защищенности информации в АС, использующей данное ПО [12, 13]. При этом уровень защищенности ПО, как правило, устанавливается экспертным путем декларативно (в качестве указанных уровней могут быть рассмотрены классы защищенности АС, использующей данное ПО). ПО считается безопасным в случае выполнения им всех функций, соответствующих заданному классу защищенности АС («функций безопасности») [14, 15].

Существенным недостатком «функционального» варианта применительно к объектам информатизации ОВД можно считать «бинарность» проводимой оценки, когда оцениваются конкретные функции безопасности, а лишь констатируется сам факт использования опасного либо безопасного ПО при реализации данных функций сертифицированными программными средствами [21]. В результате понятие «защищенность» подменяется понятием «достаточность», что не служит мерой приближения к поставленной цели защиты информации в АС ОВД, использующей данное ПО [14].

*Второй подход (экспертно-балльный)*, применяемый при оценивании уровня защищенности ПО в АС, состоит том, что факту обеспечения защищенности ПО ставится в соответствие ряд суждений специалистов-экспертов с использованием качественной шкалы, переводимой затем в балльную шкалу [14–16]. Находится сумма (либо произведение) набранных баллов, при превышении которой (которым) заданного порога принимается решение о достаточности уровня защищенности используемого ПО. Поскольку каждому полученному значению суммы (либо произведения) ставится в соответствие определенное суждение об уровне защищенности ПО, то указанную сумму (либо произведение) баллов следует рассматривать в качестве меры безопасности используемого ПО [14, 15].

Очевидным недостатком указанного подхода применительно к оцениванию уровня защищенности ПО, используемого в АС ОВД, является его недостаточная точность, что обусловлено участием экспертов в процессе оценивания.

Более подробно остановимся на *третьем (расчетном) подходе*, используемом при оценивании уровня защищенности ПО в АС, изложенном в [18, 19], поскольку на сегодняшний день он является новым, развивающимся.

Сущность данного подхода состоит в проведении комплексной оценки уровня защищенности ПО в АС путем расчета и сведения в матрицу массива показателей критичности известных уязвимостей в компонентах ПО с использованием Методики оценки уровня критичности уязвимостей программных, программно-аппаратных средств, разработанной ФСТЭК России [17] на основе стандарта CVSS (Common Vulnerability Scoring System) [23]. Определение элемента матрицы, имеющего максимальное значение в столбце  $n$ , указывает на критичность уязвимости в  $n$ -ом компоненте ПО АС, а элемента с максимальным значением в матрице в целом – на критичность уязвимости всего ПО, используемого в АС [19]. Связь полученных количественных величин с качественной оценкой уровня критичности уязвимости представлена таблицей, содержащейся в [17].

Поскольку рассчитанный показатель количественной оценки критичности уязвимости в ПО АС нормирован, автором [18, 19] предложена формула (1) для оценивания защищенности ПО в АС, определяющая вероятность неэксплуатации данной уязвимости нарушителем (вероятность эксплуатации уязвимости тем выше, чем выше ее критичность):

$$P_H = \left(1 - \frac{V_{кр}}{10}\right), \quad (1)$$

где:  $V_{кр}$  – максимальный показатель критичности уязвимости по всем компонентам ПО АС.

Для перевода количественной оценки в качественную предложена таблица значений (табл. 2), аналогичная таблице, содержащейся в [17].

**Таблица 2. Соответствие оценок защищенности ПО в АС**

**Table 2. Correspondence of software security ratings in the AS**

№ пп	Количественная оценка Quantitative assessment	Качественная оценка Qualitative assessment
1	$P_H < 0,15$	Низкий/ Short
2	$0,15 < P_H < 0,45$	Средний/Average
3	$0,45 < P_H < 0,7$	Выше среднего/Above average
4	$0,7 < P_H < 1,0$	Высокий/High

Основным недостатком рассмотренного подхода применительно к объектам информатизации ОВД является отсутствие учета временного фактора при расчете вероятности эксплуатации (неэксплуатации) нарушителем уязвимости в используемом ПО.

Указанных выше недостатков лишен *четвертый (вероятностный) подход*, используемый при оценивании уровня защищенности ПО в АС, основанный на математическом моделировании процессов эксплуатации уязвимостей в используемых программных средствах. В рамках данного подхода применяются различные критерии и показатели защищенности, методики их расчета, а также критерии оптимальности [14, 15, 20–22, 24]. Рассматриваемый подход может быть использован для описания случайных событий, в частности, на основе определения их вероятностно-временных характеристик (ВВХ).

Поскольку эксплуатация уязвимости в ПО АС представляет собой сложный динамический процесс, то для его описания в настоящее время широко применяются модели, построенные на теории марковских и полумарковских процессов, сетях Петри-Маркова [15, 24], что дает возможность определять ВВХ процесса эксплуатации уязвимости и проводить количественную оценку уровня защищенности ПО, используемого в АС ОВД, в режиме реального времени.

Существует множество мнений о приоритетности рассмотренных подходов, однако правильным, на наш взгляд, выходом для устранения отмеченных их недостатков является комплексное использование различных подходов к оцениванию уровня защищенности ПО на объектах информатизации ОВД.

Для оценивания уровня защищенности ПО в АС ОВД предлагается использовать расчетно-вероятностный подход, основанный на анализе ПО на критичность уязвимостей и математическом моделировании процесса эксплуатации уязвимостей в используемых программных средствах для определения их ВВХ.

**Вывод.** В статье приведены результаты анализа существующих в настоящее время подходов к оцениванию уровня защищенности ПО в АС с целью определения направлений совершенствования используемых методов и процедур оценивания применительно к объектам информатизации ОВД.

Результаты проведенного анализа показали целесообразность объединения существующих подходов и использования расчетно-вероятностного подхода в качестве основы для определения системы показателей уровня защищенности ПО в АС ОВД и разработки методики их расчета с учетом фактора времени.

Перспективы использования данных показателей и методики связаны с формированием предложений, содержащих практические рекомендации по проведению количественной оценки уровня защищенности ПО в АС ОВД в режиме реального времени и выбора его оптимальной версии в интересах повышения уровня защищенности служебной информации ограниченного распространения, циркулирующей и на объектах информатизации ОВД.

**Библиографический список:**

1. ГОСТ Р 56939-2016. Защита информации. Разработка безопасного программного обеспечения. Общие требования. – Москва : Стандартинформ, 2016. – 24 с.
2. ГОСТ Р ИСО/МЭК 25051-2017. Информационные технологии. Системная и программная инженерия. Требования и оценка качества систем и программного обеспечения. – Москва : Стандартинформ, 2017. – 32 с.
3. ГОСТ Р 51188-98. Защита информации. Испытания программных средств на наличие компьютерных вирусов. Типовое руководство. – Москва : ИПК Издательство стандартов, 2003. – 12 с.
4. Защита от несанкционированного доступа к информации. Часть 1. Программное обеспечение средств защиты информации. Классификация по уровню контроля отсутствия недекларированных возможностей : Руководящий документ от 4 июня 1999 г. № 114 // ФСТЭК России [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://fstec.ru/dokumenty/vse-dokumenty/spetsialnye-normativnye-dokumenty/rukovodyashchij-dokument-ot-4-iyunya-1999-g-n-114> (дата обращения: 30.10.2023).
5. Безопасность информационных технологий. Критерии оценки безопасности информационных технологий : Руководящий документ от 19 июня 2002 г. № 187 // ФСТЭК России [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://fstec.ru/dokumenty/vse-dokumenty/spetsialnye-normativnye-dokumenty/rukovodyashchij-dokument-ot-19-iyunya-2002-g-n-187> (дата обращения: 30.10.2023).
6. Об утверждении Инструкции по организации защиты персональных данных, содержащихся в информационных системах органов внутренних дел Российской Федерации : приказ МВД России от 6 июля 2012 г. № 678 (в ред. приказов МВД России от 15.07.2013 № 538, 20.04.2015 № 447, 07.12.2016 № 807) [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://base.garant.ru/70230320/?ysclid=lmdv18b7g0759105782> (дата обращения: 05.11.2023).
7. Вопросы организации информационно-правового обеспечения деятельности органов внутренних дел Российской Федерации : приказ МВД России от 25 августа 2017 г. № 680 (в ред. приказа МВД России от 23.03.2018 № 155) [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://base.garant.ru/72617376/?ysclid=lmduxlmjdz739176488> (дата обращения: 05.11.2023).
8. ГОСТ Р ИСО/МЭК 9126-93. Информационная технология. Оценка программной продукции. Характеристики качества и руководства по их применению [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://docs.cntd.ru/document/gost-r-iso-mek-9126-93> (дата обращения 05.11.2023).
9. ГОСТ 28806-89. Качество программных средств. Термины и определения [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [http://www.kimmeria.nw.ru/standart/glosys/gost\\_28806\\_90.pdf](http://www.kimmeria.nw.ru/standart/glosys/gost_28806_90.pdf) (дата обращения: 03.11.2023).
10. Средства вычислительной техники. Защита от несанкционированного доступа к информации. Показатели защищенности от несанкционированного доступа к информации : Руководящий документ от 25 июля 1997 г. № 383 // ФСТЭК России [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://fstec.ru/tekhnicheskaya-zashchita-informatsii/dokumenty/114-spetsialnye-normativnye-dokumenty/383-rukovodyashchij-dokument-reshenie-predsedatelya-gostekhkommisii-rossii-ot-25-iyulya-1997-g> (дата обращения: 06.11.2023).
11. Автоматизированные системы. Защита от несанкционированного доступа к информации. Классификация автоматизированных систем и требования по защите информации : Руководящий документ : решение Председателя Гостехкомиссии России от 30 марта 1992 г. от 30 марта 1992 г. № 384 // ФСТЭК России [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://fstec.ru/tekhnicheskaya-zashchita-informatsii/dokumenty/114-spetsialnye-normativnye-dokumenty/384-rukovodyashchij-dokument-reshenie-predsedatelya-gostekhkommisii-rossii-ot-30-marta-1992-g> (дата обращения: 05.11.2023).
12. 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 : <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293774/4293774728.pdf> (дата обращения: 28.10.2023).
13. ISO/IEC 17000:2004. Conformity assessment. Dictionary and General principles [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [https://pqm-online.com/assets/files/lib/std/iso\\_17000-2004.pdf](https://pqm-online.com/assets/files/lib/std/iso_17000-2004.pdf) (дата обращения: 06.11.2023).
14. Радько Н. М. Проникновения в операционную среду компьютера: модели злоумышленного удаленного доступа: учебное пособие / Н. М. Радько, Ю. К. Язов, Н. Н. Корнеева. – Воронеж : Воронежский государственный технический университет, 2013. – 265 с.
15. Язов Ю. К. Методология оценки эффективности защиты информации в информационных системах от несанкционированного доступа : монография / Ю. К. Язов, С. В. Соловьев. – Санкт-Петербург : Научно-технологические технологии, 2023. – 258 с.
16. ISO/IEC 27002:2005-2013. Information technology. Security method. Practical rules of information security management [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://docs.cntd.ru/document/gost-r-iso-mek-17799-2005> (дата обращения 06.11.2023).
17. 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: 05.11.2023).
18. 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.
  19. Ефимов А. О. Концептуальные основы оценки уровня защищенности автоматизированных систем на основе их уязвимости / А. О. Ефимов, И. И. Лившиц, Т. В. Мещерякова, Е. А. Рогозин // Безопасность информационных технологий = IT Security. – Том 30. – № 2(2023). – С. 63–79.
  20. 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 диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Попов Антон Дмитриевич. – Воронеж, 2018. – 163 с.
  21. Бацких А. В. Модели оценки эффективности функционирования модифицированных подсистем управления доступом к информации в автоматизированных системах органов внутренних дел : 2.3.6. диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Бацких Анна Вадимовна. – Воронеж, 2022. – 190 с.
  22. Золотых Е. С. Модели оценки опасности реализации сетевых атак в автоматизированных системах органов внутренних дел : 2.3.6. диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Золотых Елена Сергеевна. – Воронеж, 2022. – 220 с.
  23. Common Vulnerability Scoring System version 3.1. Specification Document. Revision 1 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [https://cvss-v31-specification\\_r1.pdf](https://cvss-v31-specification_r1.pdf) (дата обращения: 30.10.2023).
  24. Язов Ю. К. Сети Петри-Маркова и их применение для моделирования процессов реализации угроз безопасности информации в информационных системах : монография / Ю. К. Язов, А. В. Анищенко. – Воронеж : Кварта, 2020. – 173 с.

#### References

1. GOST R 56939-2016. Data protection. Secure software development. *General requirements*. Moscow: Standardinform, 2016; 24. (In Russ)
2. GOST R ISO/IEC 25051-2017. Information Technology. System and software engineering. Requirements and quality assessment of systems and software. Moscow: Standardinform, 2017; 32. (In Russ)
3. GOST R 51188-98. Data protection. Testing software for the presence of computer viruses. Model manual. – Moscow: IPK Publishing House of Standards, 2003; 12. (In Russ)
4. Protection against unauthorized access to information. Part 1. Information security software. Classification according to the level of control over the absence of undeclared capabilities: Guiding document dated June 4, 1999 No. 114 // FSTEC of Russia [Electronic resource]. – Access mode: <https://fstec.ru/dokumenty/vse-dokumenty/spetsialnye-normativnye-dokumenty/rukovodyashchij-dokument-ot-4-iyunya-1999-g-n-114> (date of access: 10/30/2023). (In Russ)
5. Information technology security. Criteria for assessing the security of information technologies: Guiding document dated June 19, 2002; 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> (date of access: 10/30/2023). (In Russ)
6. On approval of the Instructions for organizing the protection of personal data contained in information systems of internal affairs bodies of the Russian Federation: order of the Ministry of Internal Affairs of Russia dated July 6, 2012 No. 678 (as amended by orders of the Ministry of Internal Affairs of Russia dated July 15, 2013 No. 538, 20.04. 2015 No. 447, 07.12.2016 No. 807) [Electronic resource]. Access mode: <https://base.garant.ru/70230320/?ysclid=lmdv18b7g0759105782> (access date: 11/05/2023). (In Russ)
7. Issues of organizing information and legal support for the activities of internal affairs bodies of the Russian Federation: order of the Ministry of Internal Affairs of Russia dated August 25, 2017 No. 680 (as amended by order of the Ministry of Internal Affairs of Russia dated March 23, 2018 No. 155) [Electronic resource]. – Access mode: <https://base.garant.ru/72617376/?ysclid=lmduxlmjdz739176488> (access date: 11/05/2023). (In Russ)
8. GOST R ISO/IEC 9126-93. Information technology. Evaluation of software products. Quality characteristics and guidelines for their use [Electronic resource]. – Access mode: <http://docs.cntd.ru/document/gost-r-iso-mek-9126-93> (access date 05.11.2023). (In Russ)
9. GOST 28806-89. Quality of software. Terms and definitions [Electronic resource]. Access mode: [http://www.kimmeria.nw.ru/standart/glosys/gost\\_28806\\_90.pdf](http://www.kimmeria.nw.ru/standart/glosys/gost_28806_90.pdf) (access date: 11/03/2023). (In Russ)
10. Computer facilities. Protection against unauthorized access to information. Indicators of security against unauthorized access to information: Guiding document dated July 25, 1997 No. 383 // FSTEC of Russia [Electronic resource]. Access mode: <http://fstec.ru/tekhnicheskaya-zashchita-informatsii/dokumenty/114-spetsialnye-normativnye-dokumenty/383-rukovodyashchij-dokument-reshenie-predsdatelya-gostekhkommisii-rossii-ot-25-iyulya-1997-g> (date of access: 11/06/2023). (In Russ)
11. Automated systems. Protection against unauthorized access to information. Classification of automated

- systems and requirements for information protection: Guiding document: decision of the Chairman of the State Technical Commission of Russia dated March 30, 1992 No. 384 // FSTEC of Russia [Electronic resource]. Access mode: <https://fstec.ru/tekhnicheskaya-zashchita-informatsii/dokumenty/114-spetsialnye-normativnye-dokumenty/384-rukovodyashchij-dokument-reshenie-predsedatelya-gostekhkommisii-rossii-ot-30-marta-1992-g> (date of access: 05.11.2023). (In Russ)
12. GOST R ISO/IEC 15408-2-2013. Information technology. Methods and means of ensuring security. Criteria for assessing the security of information technologies. Part 2: Functional security components [Electronic resource]. Access mode: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293774/4293774728.pdf> (date of access: 10/28/2023). (In Russ)
  13. ISO/IEC 17000:2004. Conformity assessment. Dictionary and General principles [Electronic resource]. Access mode: [https://pqm-online.com/assets/files/lib/std/iso\\_17000-2004.pdf](https://pqm-online.com/assets/files/lib/std/iso_17000-2004.pdf) (access date: 11/06/2023). (In Russ)
  14. Radko N. M. Penetrations into the computer operating environment: models of malicious remote access: textbook. N. M. Radko, Yu. K. Yazov, N. N. Korneeva. Voronezh: Voronezh State Technical University, 2013; 265. (In Russ)
  15. Yazov Yu. K., Solovyov S. V. Methodology for assessing the effectiveness of information protection in information systems from unauthorized access: monograph. St. Petersburg: High technology, 2023; 258. (In Russ)
  16. ISO/IEC 27002:2005-2013. Information technology. Security method. Practical rules of information security management [Electronic resource]. Access mode: <http://docs.cntd.ru/document/gost-r-iso-mek-17799-2005> (access date 06.11.2023). (In Russ)
  17. Methodology for assessing the level of criticality 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: 05.11.2023). (In Russ)
  18. 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)
  19. Efimov A. O. Conceptual basis 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)
  20. 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 dissertation for the scientific degree of Candidate of Technical Sciences / Popov Anton Dmitrievich. Voronezh, 2018; 163. (In Russ)
  21. Batskikh A.V. Models for assessing the effectiveness of the functioning of modified subsystems for managing access to information in automated systems of internal affairs bodies: 2.3.6. dissertation for the degree of candidate of technical sciences / Batskikh Anna Vadimovna. Voronezh, 2022; 190. (In Russ)
  22. Zolotykh E. S. Models for assessing the danger of implementing network attacks in automated systems of internal affairs bodies: 2.3.6. dissertation for the degree of candidate of technical sciences / Elena Sergeevna Zolotykh. Voronezh, 2022; 220. (In Russ)
  23. Common Vulnerability Scoring System version 3.1. Specification Document. Revision 1 [Electronic resource]. Access mode: [https://cvss-v31-specification\\_r1.pdf](https://cvss-v31-specification_r1.pdf) (access date: 10/30/2023). (In Russ)
  24. Yazov Yu. K. Petri-Markov networks and their application for modeling the processes of implementing threats to information security in information systems: monograph. Yu. K. Yazov, A. V. Anishchenko. – Voronezh: Kvarta, 2020; 173. (In Russ)

#### **Сведения об авторах:**

Дровникова Ирина Григорьевна, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры автоматизированных информационных систем органов внутренних дел; [idrovnikova@mail.ru](mailto:idrovnikova@mail.ru)

Попова Арина Дмитриевна, адъюнкт кафедры автоматизированных информационных систем органов внутренних дел; [arnpva@mail.ru](mailto:arnpva@mail.ru)

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

Irina G. Drovnikova, Dr. Sci.(Eng.), Assoc. Prof., Prof., Department of Automated Information Systems of Internal Affairs Bodies; [ldrovnikova@mail.ru](mailto:ldrovnikova@mail.ru)

Arina D. Popova, Adjunct, Department of Automated Information Systems of Internal Affairs Bodies; [arnpva@mail.ru](mailto:arnpva@mail.ru)

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

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

**Поступила в редакцию/ Received 06.11.2023.**

**Одобрена после рецензирования/ Revised 21.11.2023.**

**Принята в печать/ Accepted for publication 21.11.2023.**

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ**  
**INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS**

УДК 004. 056.57

DOI: 10.21822/2073-6185-2023-50-4-93-100



Оригинальная статья /Original article

**Разработка методов нейтрализации угроз «нулевого дня»**

**А.И. Дубровина<sup>1,2</sup>, Мустафа Х. Алкорди<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Донской государственный технический университет,

<sup>1</sup>344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1, Россия,

<sup>2</sup>Частное образовательное учреждение высшего образования

«Южный университет» (Институт управления, бизнеса и права),

<sup>2</sup>344000, г. Ростов-на-Дону, ул. Мечникова, 130, Россия

**Резюме. Цель.** Целью данного исследования является разработка и анализ методов нейтрализации угроз «нулевого дня» с целью повышения уровня кибербезопасности и защиты информационных систем. **Метод.** В настоящей статье использован поведенческий анализ угрозы. Изучены характерные признаки поведения эксплойта «нулевого дня». Модель угрозы основана на решении задач по своевременному обнаружению и нейтрализации угрозы. **Результат.** Рассмотрена актуальная проблема безопасности информационных систем - угроза «нулевого дня». Проведены обзор существующих методов нейтрализации и обсуждение эффективных новых подходов. Выявлено, что основным уязвимым местом являются устаревшие сигнатуры угроз. Обнаружение угроз основано на исследовании поведения программных обеспечений – сравнение с предыдущим днем, отслеживание возможно преимущественно за счет анализа log-файлов, снятых с автоматизированного рабочего места. **Вывод.** Доказана важность разработки методов нейтрализации угроз «нулевого дня» во избежание централизованного распространения уязвимости и заражения большого числа автоматизированных рабочих мест, что может привести к приостановке производственных процессов в рамках большого предприятия.

**Ключевые слова:** информационная безопасность, атака нулевого дня

**Для цитирования:** А.И. Дубровина, Мустафа Х. Алкорди. Разработка методов нейтрализации угроз «нулевого дня». Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023; 50(4):93-100. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-4-93-100

**Development of methods for neutralizing «Zero-day» threats**

**A.I. Dubrovina<sup>1,2</sup>, Mustafa H. Alcordi<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Don State Technical University,

<sup>1</sup> 1 Gagarin Square, Rostov-on-Don 344000, Russia

<sup>2</sup>Southern University (Institute of Management, Business and Law),

<sup>2</sup> 130 Mechnikova St., Rostov-on-Don 344000, Russia

**Abstract. Objective.** The purpose of this study is to develop and analyze methods for neutralizing «zero-day» threats in order to increase the level of cybersecurity and protection of information systems. **Method.** In this article, a behavioral analysis of the threat is used. The characteristic features of the zero-day exploit behavior have been studied. The threat model is based on solving the tasks of timely detection and neutralization of the threat. **Result.** The actual problem of information systems security - the threat of «zero-day» is considered. The review of existing neutralization methods and discussion of effective new approaches were carried out. It has been revealed that the main vulnerability is outdated threat signatures. Threat detection is based on a study of the behavior of software a comparison with the previous day tracking is possible mainly by analyzing log files taken from an automated workplace. **Conclusion.** The content of this work emphasizes the importance of developing methods to neutralize «zero-day» threats in

order to avoid the centralized spread of vulnerability and infection of a large number of automated workplaces, which can lead to the suspension of production processes within a large enterprise.

**Keywords:** information security, zero-day attack

**For citation:** A.I. Dubrovina, Mustafa H. Alcordi. Development of methods for neutralizing «Zero-day» threats. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2023; 50(4):93-100. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-4-93-100

**Введение.** Развитие методов нейтрализации угроз «нулевого дня» является актуальной проблемой на сегодняшний день в связи с масштабами распространения и неоднозначности возникновения. Современная информационная среда становится все более сложной и уязвимой перед новыми видами кибератаками. Угрозы «нулевого дня» представляют собой особый вызов для сферы кибербезопасности, так как атаки происходят на стадии, когда уязвимости еще не известны владельцам системы или разработчикам программного обеспечения.

**Постановка задачи.** Атаки «нулевого дня»: захват уязвимостей в мире кибербезопасности. «Нулевой день» - это широкий термин, описывающий недавно обнаруженные уязвимости в системе безопасности, которые хакеры могут использовать для атак на системы [1]. Термин «нулевой день» относится к тому факту, что поставщик или разработчик только что узнал об ошибке, что означает, что у них есть «нулевые дни», чтобы исправить ее. Для достижения цели исследования были поставлены следующие задачи:

1. Изучить сущность и особенности угроз «нулевого дня».
2. Провести обзор существующих методов нейтрализации киберугроз, добавив реальные примеры.
3. Разработать новые подходы и методы нейтрализации угроз «нулевого дня».

**Методы исследования.** Атака нулевого дня происходит, когда хакеры используют уязвимость до того, как разработчики успевают ее устранить. Нулевой день иногда записывается как 0-day. Слова уязвимость, эксплойт и атака обычно используются вместе с нулевым днем, и полезно понимать разницу:

Уязвимость нулевого дня - это уязвимость программного обеспечения, обнаруженная злоумышленниками до того, как о ней стало известно производителю. Поскольку поставщики ничего не знают, для уязвимостей нулевого дня не существует исправлений при проведении пентестинга, что повышает вероятность успеха атак [2].

Эксплойты «нулевого дня»: скрытая угроза и импакт в киберпространстве, в связи с чем применяется поведенческий метод исследования. Эксплойт нулевого дня - это метод, который хакеры используют для атаки на системы с ранее неизвестной уязвимостью. Атака нулевого дня - это использование эксплойта нулевого дня для нанесения ущерба или кражи данных из системы, затронутой уязвимостью. Для атаки нулевого дня хакеры разрабатывают и применяют специализированные программные коды, называемые эксплойтами. Эксплойты представляют собой инструкции, которые позволяют злоумышленникам взламывать уязвимые компоненты системы. Эти коды могут использоваться для разнообразных целей, включая кражу данных, установку вредоносных программ или даже блокировку системы (рэнсомвары) [3,4].

Программное обеспечение часто имеет уязвимости в системе безопасности, которые хакеры могут использовать для создания хаоса рэнсомвары [5]. Разработчики программного обеспечения всегда ищут уязвимости, чтобы «залатать», то есть разработать решение, которое они выпускают в новом обновлении.

Однако иногда хакеры или злоумышленники замечают уязвимость раньше разработчиков программного обеспечения. Пока уязвимость все еще открыта, злоумышленники могут написать и внедрить код, чтобы воспользоваться ею. Это известно как код эксплойта. Код эксплойта может привести к тому, что пользователи программного

обеспечения станут жертвами, например, в результате кражи личных данных или других форм киберпреступности. Как только злоумышленники обнаруживают уязвимость нулевого дня, им нужен способ добраться до уязвимой системы [6]. Они часто делают это с помощью электронной почты с социальной инженерией, т. е. электронной почты или другого сообщения, которое предположительно исходит от известного или законного корреспондента, но на самом деле от злоумышленника. Сообщение пытается убедить пользователя выполнить действие, например, открыть файл или посетить вредоносный веб-сайт. При этом загружается вредоносное ПО злоумышленника, которое проникает в файлы пользователя и крадет конфиденциальные данные.

Результатом успешной атаки нулевого дня может быть серьезное нарушение безопасности, что ведет к потенциальным убыткам как для организаций, так и для отдельных пользователей. Кража личных данных, финансовые потери, нарушение репутации – все это возможные последствия атак нулевого дня [7]. Когда об уязвимости становится известно, разработчики пытаются исправить ее, чтобы остановить атаку (рис. 1).

Однако зачастую уязвимости системы безопасности обнаруживаются не сразу. Иногда могут пройти дни, недели или даже месяцы, прежде чем разработчики определяют уязвимость, которая привела к атаке. И даже когда патч нулевого дня выпущен, не все пользователи быстро внедряют его. В последние годы хакеры стали быстрее использовать уязвимости вскоре после их обнаружения. Эксплойты можно продавать в даркнете за большие деньги. Как только эксплойт обнаружен и исправлен, его больше не называют угрозой нулевого дня.



Рис. 1. Timeline of zero-day attack

Fig. 1. Timeline of zero-day attack

Атаки нулевого дня особенно опасны, потому что о них знают только сами злоумышленники. Как только они проникли в сеть, преступники могут либо немедленно атаковать, либо сидеть и ждать наиболее выгодного момента для этого [8].

**Мотивации и цели злоумышленника при внедрении уязвимости «нулевого дня».** Злоумышленники, осуществляющие атаки нулевого дня, делятся на разные категории в зависимости от их мотивации.

Например: киберпреступники - хакеры, мотивация которых обычно связана с финансовой выгодой; хактивисты - хакеры, мотивированные политическими или социальными причинами, которые хотят, чтобы атаки были видны, чтобы привлечь внимание к их делу; корпоративный шпионаж - хакеры, которые шпионят за компаниями, чтобы получить информацию о них; кибервойна - страны или политические деятели, шпионящие или атакующие кибер инфраструктуру другой страны.

Взлом нулевого дня может использовать уязвимости в различных системах, в том числе: операционные системы; Веб-браузеры; офисные приложения; компоненты с открытым исходным кодом; аппаратное обеспечение и прошивка; интернет вещей (IoT).

В результате существует широкий круг потенциальных жертв: люди, использующие уязвимую систему, например, браузер или операционную систему; хакеры могут использовать уязвимости в системе безопасности для взлома устройств и создания крупных бот-сетей;

лица, имеющие доступ к ценным бизнес-данным, таким как интеллектуальная собственность; аппаратные устройства, микропрограммы и Интернет вещей; крупные предприятия и организации; государственные органы; политические цели и/или угрозы национальной безопасности.

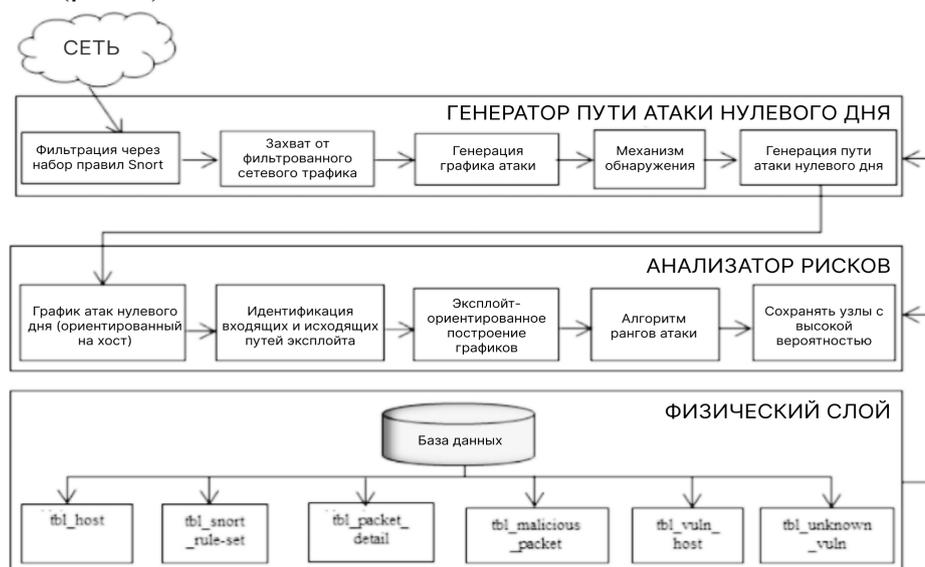
К разновидности атак «нулевого дня» относят следующие:

1. Целевые атаки «нулевого дня» осуществляются против потенциально ценных целей, таких как крупные организации, государственные учреждения или высокопоставленные лица.
2. Нецелевые атаки нулевого дня обычно проводятся против пользователей уязвимых систем, таких как операционная система или браузер.

Даже когда злоумышленники не нацелены на конкретных лиц, большое количество людей все равно может быть затронуто атаками нулевого дня, обычно в качестве побочного ущерба. Нецелевые атаки направлены на захват как можно большего числа пользователей, а это означает, что могут быть затронуты данные среднего пользователя [9].

Поскольку уязвимости нулевого дня могут принимать различные формы, такие как отсутствие шифрования данных, отсутствие авторизации, неработающие алгоритмы, ошибки, проблемы с безопасностью паролей и т. д., их может быть сложно обнаружить. Из-за характера этих типов уязвимостей подробная информация об эксплоитах нулевого дня доступна только после того, как эксплойт будет идентифицирован.

Ниже представлена архитектура трех уровней для обнаружения и анализа атак «нулевого дня» (рис. 2).



**Рис. 2. The proposed three layer architecture for zero-day attack detection and analysis**  
**Fig. 2. The proposed three layer architecture for zero-day attack detection and analysis**

Организации, атакованные эксплойтом нулевого дня, могут обнаружить неожиданный трафик или подозрительную активность сканирования, исходящие от клиента или службы. Некоторые из методов обнаружения нулевого дня включают в себя:

Использование существующих баз данных вредоносных программ и их поведение в качестве эталона. Хотя эти базы данных обновляются очень быстро и могут быть полезны в качестве ориентира, эксплойты нулевого дня по определению являются новыми и неизвестными [10]. Таким образом, существует предел того, что существующая база данных может вам сообщить. Кроме того, некоторые методы ищут характеристики вредоносных программ нулевого дня на основе того, как они взаимодействуют с целевой системой. Вместо изучения кода входящих файлов этот метод рассматривает их взаимодействие с существующим программным обеспечением и пытается определить, являются ли они результатом злонамеренных действий.

Машинное обучение все чаще используется для обнаружения данных ранее зарегистрированных эксплойтов, чтобы установить базовый уровень безопасного поведения системы на основе данных о прошлых и текущих взаимодействиях с системой. Чем больше данных доступно, тем надежнее становится обнаружение [11]. Часто используется гибридный подход различных систем обнаружения.

Новейшие атаки нулевого дня, примеры и исходы. В данной подборке мы рассмотрим несколько выдающихся случаев, где уязвимости были эксплуатированы до их обнаружения и устранения. Наиболее опасными инцидентами информационной безопасности являются следующие [12]:

2021: Уязвимость «нулевого дня в Chrome». В 2021 году Google Chrome столкнулся с серией угроз «нулевого дня», в результате чего Chrome стал выпускать обновления. Уязвимость возникла из-за ошибки в движке JavaScript V8, используемом в веб-браузере.

2020: Zoom. В популярной платформе для видеоконференций обнаружена уязвимость. В этом примере атаки «нулевого дня» хакеры получили удаленный доступ к ПК пользователя, если тот работал под управлением более старой версии Windows. Если целью был администратор, хакер мог полностью захватить его компьютер и получить доступ ко всем его файлам.

2020: Apple iOS. iOS от Apple часто называют самой безопасной из основных платформ для смартфонов. Однако в 2020 году он стал жертвой как минимум двух наборов уязвимостей нулевого дня iOS, включая ошибку нулевого дня, которая позволяла злоумышленникам удаленно скомпрометировать iPhone.

2019: Microsoft Windows, Восточная Европа. Эта атака была направлена на привилегии локального повышения, уязвимую часть Microsoft Windows и правительственные учреждения в Восточной Европе. Эксплойт нулевого дня злоупотреблял уязвимостью локальных привилегий в Microsoft Windows для запуска произвольного кода и установки приложений, а также для просмотра и изменения данных в скомпрометированных приложениях. После того, как атака была обнаружена и о ней было сообщено в Центр реагирования Microsoft Security Response Center, было разработано и выпущено исправление.

2017: Microsoft Word. Этот эксплойт нулевого дня взломал личные банковские счета. Жертвами стали люди, которые невольно открыли вредоносный документ Word. В документе отображалось приглашение «загрузить удаленный контент», показывающее пользователям всплывающее окно с запросом внешнего доступа из другой программы. Когда жертвы нажимали «да», документ устанавливал на их устройства вредоносное ПО, которое могло перехватывать учетные данные для входа в банк [13].

Stuxnet. Одним из самых известных примеров атаки «нулевого дня» стал Stuxnet. Этот вредоносный компьютерный червь, впервые обнаруженный в 2010 году, но уходящий корнями в 2005 год, поражал производственные компьютеры, на которых установлено программное обеспечение программируемого логического контроллера (ПЛК). Основной целью были иранские заводы по обогащению урана, чтобы сорвать ядерную программу страны. Червь заражал ПЛК через уязвимости в программном обеспечении Siemens Step7, заставляя ПЛК выполнять неожиданные команды на конвейерном оборудовании.

В условиях быстрого развития киберугроз и постоянно меняющихся методов атак, разработка новых подходов и методов нейтрализации угроз «нулевого дня» становится неотъемлемой составляющей в обеспечении безопасности информационных систем [14].

Основными действенными подходами и методами, которые могут быть эффективно применены для предотвращения атак «нулевого дня» являются следующие.

1. Искусственный интеллект и машинное обучение: Применение методов искусственного интеллекта (ИИ) и машинного обучения (МО) имеет огромный потенциал в обнаружении атак «нулевого дня». Алгоритмы МО могут анализировать необычное поведение в системе, выявлять аномалии и определять потенциально опасные ситуации. Такие системы способны обнаруживать атаки на ранних стадиях,

- когда уязвимости еще неизвестны [14].
2. Анализ поведения и контекста: Одним из ключевых аспектов при разработке методов нейтрализации атак «нулевого дня» является анализ поведения и контекста пользователей и системы [15,16]. Системы могут отслеживать действия пользователей и выявлять аномалии в их поведении. Кроме того, контекстная информация, такая как тип устройства, местоположение, время суток, также может быть использована для более точного определения атак.
  3. Проактивное обнаружение уязвимостей: Одним из способов снижения риска атак «нулевого дня» является акцент на проактивном обнаружении и устранении уязвимостей [17]. Это включает в себя регулярное тестирование на уязвимости, аудит кода программного обеспечения, а также использование инструментов автоматического сканирования для поиска потенциальных слабых мест.
  4. Децентрализованные системы и блокчейн: Использование децентрализованных систем и технологии блокчейн также может способствовать повышению безопасности от атак «нулевого дня» [17,18]. Блокчейн может обеспечить надежное хранение данных об уязвимостях и атаках, а децентрализованные системы могут усложнить процесс атаки, требуя атакующему контролировать большое количество узлов.
  5. Разработка адаптивных систем: Атаки «нулевого дня» могут быть чрезвычайно многообразными и могут обходить существующие меры защиты. Разработка адаптивных систем, способных быстро реагировать на новые угрозы и атаки, может значительно повысить эффективность нейтрализации атак «нулевого дня».

**Обсуждение результатов.** Разработка новых подходов и методов нейтрализации угроз «нулевого дня» является необходимой задачей в сфере кибербезопасности. Интеграция искусственного интеллекта, анализа поведения, проактивного обнаружения уязвимостей, использование децентрализованных систем и создание адаптивных решений способствуют более надежной защите информационных систем от этого сложного типа атак [19]. Дальнейшие исследования и разработки в этой области могут значительно содействовать созданию более безопасной киберсреды.

В ходе исследования был проведен анализ угроз «нулевого дня» на примере известных атак и уязвимостей. Был проведен обзор существующих методов защиты информационных систем, включая методы обнаружения и предотвращения уязвимостей, контроля доступа и шифрования данных.

На основе проведенного анализа были разработаны новые методы нейтрализации угроз «нулевого дня», включая комбинацию проактивного обнаружения уязвимостей, механизмов автоматического обновления программного обеспечения и обучения персонала.

Предложенные в данной статье инновационные подходы и методы представляют собой своего рода революцию в области кибербезопасности. Искусственный интеллект и машинное обучение вместе с анализом поведения и контекста создают надежные барьеры перед угрозами «нулевого дня», обнаруживая аномалии и предупреждая о потенциальных атаках [20,21]. Проактивное обнаружение уязвимостей позволяет заметить слабые места до того, как они станут объектом атак. Использование децентрализованных систем и блокчейна добавляет сложности для злоумышленников, а разработка адаптивных систем обеспечивает гибкую защиту в постоянно меняющейся угрозной среде.

Однако важно понимать, что борьба с угрозами «нулевого дня» - это непрерывный и динамичный процесс. С каждым новым технологическим прорывом, киберпреступники находят новые пути атаки. Поэтому разработка методов нейтрализации угроз «нулевого дня» должна быть постоянной и систематической. Кроме того, не менее важным фактором является взаимодействие и обмен опытом между специалистами в области кибербезопасности, так как это способствует более эффективной адаптации к новым угрозам.

Все это свидетельствует о необходимости продолжения исследований и инноваций в области кибербезопасности.

**Вывод.** Современный мир, пронизанный информационными технологиями, требует высокого уровня кибербезопасности, который может устоять перед постоянно меняющимися угрозами. В наше время, когда киберпреступники постоянно стремятся к новым методам и техникам атак, разработка методов нейтрализации угроз «нулевого дня» становится неотъемлемой частью стратегии обеспечения безопасности информационных систем. Разработка методов нейтрализации угроз «нулевого дня» - это ключевой элемент в обеспечении стабильной и безопасной киберсреды, которая позволит современному обществу развиваться и процветать в век информационных технологий.

#### Библиографический список:

1. Journal of Information Security and Applications // Volume 46 June 2019 Pages 164-172
2. Huang, L., Joseph, A., Nelson, H., & Rubinstein, B. Adversarial machine learning // Proceedings of the 4th ACM workshop on Security and artificial intelligence. ACM, 2011. Pp. 43-58.
3. Rieck, K., Trinius, P., Willems, C., Holz, T., & Bos, H. Automatic analysis of malware behavior using machine learning // Journal of Computer Security, 19(4), 639-668.
4. DDoS-атаки. Причины возникновения, классификация и защита от DDoS-атак [Электронный ресурс]. URL: <http://efsol.ru/articles/ddos-attacks.html> (дата обращения 19.07.2023).
5. Флёнов М. Linux глазами хакера. - СПб.:БХВ-Петербург, 2010.- 480 с.
6. High-Tech Crime Trends 2017. Group-IB Report. – URL: <https://www.group-ib.ru/resources/threat-research/2017-report.html>. (Accessed: 18.03.18).
7. Topical Cyber-threats 2017. Positive Technologies Report. – URL: [https://www.ptsecurity.com/upload/corporate/ru-ru/webinars/ics/webinar\\_290218.pdf](https://www.ptsecurity.com/upload/corporate/ru-ru/webinars/ics/webinar_290218.pdf) (Accessed: 14.03.18).
8. Meicong Li, Wei Huang. The Study of APT Attack Stage Model. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&number=7550947&tag=1> (Accessed: 18.03.18).
9. Targeted Attack Anatomy. Kaspersky Lab. — URL: <https://www.kaspersky.ru/blog/targeted-attack-anatomy/4388/> (Accessed: 15.03.18). (In Russ).
10. B. B. Gupta, Aakanksha Tewari. Fighting against phishing attacks: state of the art and future challenges. – URL: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs00521-016-2275-y.pdf> (Accessed: 25.03.18).
11. Spear-Phishing Attacks. Why they are successful and how to stop them. FireEye Report. – URL: <https://www.fireeye.com/content/dam/fireeye-www/global/en/products/pdfs/wp-fireeye-how-stop-spearphishing.pdf> (Accessed: 25.03.18).
12. How social engineering opens a door to your organization. Positive Technologies Report. – URL: <https://www.ptsecurity.com/upload/corporate/ru-ru/analytics/Social-engineering-rus.pdf> (Accessed: 16.04.2018). (in Russian).
13. Topical Cyberthreats 2017— Trends and forecasts. Positive Technologies Report. – URL: <https://www.ptsecurity.com/upload/corporate/ru-ru/analytics/Cybersecurity-threatscape-2017-rus.pdf> (Accessed: 15.03.18). (in Russian).
14. Tzipora Halevi, Nasir Memon, Oded Nov. Spear-Phishing in the Wild: A Real-World Study of Personality, Phishing Self-efficacy and Vulnerability to Spear-Phishing Attacks. – URL: [https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract\\_id=2544742](https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=2544742) (Accessed: 16.04.2018).
15. Scott Donnelly. Soft Target: The Top 10 Vulnerabilities Used by Cybercriminals. RecordedFuture Report. – URL: <https://go.recordedfuture.com/hubfs/reports/cta-2018-0327.pdf> (Accessed: 16.04.2018).
16. Gone in a Flash: Top 10 Vulnerabilities Used by Exploit Kits. RecordedFuture Report. — URL: <https://www.recordedfuture.com/top-vulnerabilities-2015/> (Accessed: 16.04.2018).
17. New Kit, Same Player: Top 10 Vulnerabilities Used by Exploit Kits in 2016.] Recorded Future Report. – URL: <https://www.recordedfuture.com/top-vulnerabilities-2016/> (Accessed: 16.04.2018).
18. Daniela Oliveira Harold Rocha Huizi Yang. Dissecting Spear Phishing Emails for Older vs Young Adults: On the Interplay of Weapons of Influence and Life Domains in Predicting Susceptibility to Phishing. – URL: <https://dl.acm.org/citation.cfm?id=3025831> (Accessed: 16.04.2018).
19. Thomas, J. E. Individual Cyber Security: Empowering Employees to Resist Spear Phishing to Prevent Identity Theft and Ransomware Attacks. – URL: [https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract\\_id=3171727](https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3171727) (Accessed: 16.04.2018).
20. Zhurin S.I., Comprehensiveness of Response to Internal Cyber-Threat and Selection of Methods to Identify the Insider. ICT Res. Appl., Vol. 8, No. 3, 2015, p. 230 – 248.
21. Zhurin S.I. Basics of countermeasures against insider threats. Tutorial for students. MEPhI, 2014. p. 262.

#### References

1. Journal of Information Security and Applications. June 2019; 46:164-172

2. Huang, L., Joseph, A., Nelson, H., & Rubinstein, B. Adversarial machine learning. *Proceedings of the 4th ACM workshop on Security and artificial intelligence*. ACM, 2011; 43-58.
3. Rieck, K., Trinius, P., Willems, C., Holz, T., & Bos, H. Automatic analysis of malware behavior using machine learning. *Journal of Computer Security*, 19(4), 639-668.
4. DDoS attacks. Causes of occurrence, classification and protection from DDoS attacks [Electronic resource]. URL: <http://efsol.ru/articles/ddos-attacks.html> (accessed 07.19.2023).
5. Flenov M. Linux through the eyes of a hacker. - St. Petersburg: BHV-Petersburg, 2010; 480. (In Russ).
6. High-Tech Crime Trends 2017. Group-IB Report. – URL: <https://www.group-ib.ru/resources/threat-research/2017-report.html>. (Accessed: 18.03.18).
7. Topical Cyber-threats 2017. Positive Technologies Report. – URL: [https://www.ptsecurity.com/upload/corporate/ru-ru/webinars/ics/webinar\\_290218.pdf](https://www.ptsecurity.com/upload/corporate/ru-ru/webinars/ics/webinar_290218.pdf) (Accessed: 14.03.18).
8. Meicong Li, Wei Huang. The Study of APT Attack Stage Model. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7550947&tag=1> (Accessed: 18.03.18).
9. Targeted Attack Anatomy. Kaspersky Lab. — URL: <https://www.kaspersky.ru/blog/targeted-attack-anatomy/4388/> (Accessed: 15.03.18). (in Russ.).
10. B. B. Gupta, Aakanksha Tewari. Fighting against phishing attacks: state of the art and future challenges. – URL: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs00521-016-2275-y.pdf> (Accessed: 25.03.18).
11. Spear-Phishing Attacks. Why they are successful and how to stop them. FireEye Report. – URL: <https://www.fireeye.com/content/dam/fireeye-www/global/en/products/pdfs/wp-fireeye-how-stop-spearphishing.pdf> (Accessed: 25.03.18).
12. How social engineering opens a door to your organization. Positive Technologies Report. – URL: <https://www.ptsecurity.com/upload/corporate/ru-ru/analytics/Social-engineering-rus.pdf> (Accessed: 16.04.2018). (In Russ).
13. Topical Cyberthreats 2017 Trends and forecasts. Positive Technologies Report. – URL: <https://www.ptsecurity.com/upload/corporate/ru-ru/analytics/Cybersecurity-threatscape-2017-rus.pdf> (Accessed: 15.03.18). (In Russ).
14. Tzipora Halevi, Nasir Memon, Oded Nov. Spear-Phishing in the Wild: A Real-World Study of Personality, Phishing Self-efficacy and Vulnerability to Spear-Phishing Attacks. – URL: [https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract\\_id=2544742](https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=2544742) (Accessed: 16.04.2018).
15. Scott Donnelly. Soft Target: The Top 10 Vulnerabilities Used by Cybercriminals. RecordedFuture Report. – URL: <https://go.recordedfuture.com/hubfs/reports/cta-2018-0327.pdf> (Accessed: 16.04.2018).
16. Gone in a Flash: Top 10 Vulnerabilities Used by Exploit Kits. RecordedFuture Report. — URL: <https://www.recordedfuture.com/top-vulnerabilities-2015/> (Accessed: 16.04.2018).
17. New Kit, Same Player: Top 10 Vulnerabilities Used by Exploit Kits in 2016.] Recorded Future Report. – URL: <https://www.recordedfuture.com/top-vulnerabilities-2016/> (Accessed: 16.04.2018).
18. Daniela Oliveira Harold Rocha Huizi Yang. Dissecting Spear Phishing Emails for Older vs Young Adults: On the Interplay of Weapons of Influence and Life Domains in Predicting Susceptibility to Phishing. – URL: <https://dl.acm.org/citation.cfm?id=3025831> (Accessed: 16.04.2018).
19. Thomas, J. E. Individual Cyber Security: Empowering Employees to Resist Spear Phishing to Prevent Identity Theft and Ransomware Attacks. – URL: [https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract\\_id=3171727](https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3171727) (Accessed: 16.04.2018).
20. Zhurin S.I., Comprehensiveness of Response to Internal Cyber-Threat and Selection of Methods to Identify the Insider. *ICT Res. Appl.*, 2015; 8(3): 230 – 248.
21. Zhurin S.I. Basics of countermeasures against insider threats. Tutorial for students. *MEPhI*, 2014; 262.

#### **Сведения об авторах:**

Дубровина Ангелина Игоревна, ассистент, кафедра «Вычислительные системы и информационная безопасность»; [adubrovina@yug.gkovd.ru](mailto:adubrovina@yug.gkovd.ru)

Алкорди Мустафа Хельми Муса, студент, кафедра «Вычислительные системы и информационная безопасность»; [ministrelia69@yandex.ru](mailto:ministrelia69@yandex.ru).

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

Angelina I. Dubrovina, Assistant, Department of Computer Systems and Information Security; [adubrovina@yug.gkovd.ru](mailto:adubrovina@yug.gkovd.ru)

Alkordi Mustafa Helmi Musa, Student, Department of Computer Systems and Information Security; [ministrelia69@yandex.ru](mailto:ministrelia69@yandex.ru).

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

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

**Поступила в редакцию/ Received 27.10.2023.**

**Одобрена после рецензирования/ Revised 16.11.2023.**

**Принята в печать/ Accepted for publication 16.11.2023.**

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ**  
**INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS**

УДК 004.056

DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-4-101-108



Оригинальная статья/ Original article

**Об отдельных аспектах стандартизации и условий функционирования  
автоматизированных систем**

**А.О.Ефимов<sup>1</sup>, И.И. Лившиц<sup>2</sup>, М.О.Мещеряков<sup>3</sup>, Е.А. Рогозин<sup>4</sup>, В.Р.Романова<sup>5</sup>**

<sup>1,4,5</sup> Воронежский институт МВД России,

<sup>1,4,5</sup> 394065, г. Воронеж, пр. Патриотов, 53, Россия,

<sup>2</sup> Национальный исследовательский университет ИТМО,

<sup>2</sup> 197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49, Россия,

<sup>3</sup> Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана,

<sup>3</sup> 105005, г. Москва, 2-я Бауманская улица, 5, стр. 1, Россия

**Резюме. Цель.** Рассмотрены основные аспекты условий функционирования АС, а также вопросы стандартизации стадий жизненного цикла АС (создания, ввода в эксплуатацию, сопровождения и пр.) на государственном уровне. В данной предметной области рассматриваются технологические особенности построения АС на базе различных технических архитектур, так как в настоящее время применимы как зарубежные процессоры на базе архитектур x86-64, так и процессоры отечественной разработки на основе архитектуры ARM (Advanced RISC Machine). Применение различных компонент АС требует дополнительной проработки вопросов с точки зрения упорядочивания состава и конфигурации конкретных СЗИ. Многоуровневая архитектура процессора объективно усложняет возможности для полного тестирования безопасности и обнаружения всех уязвимостей. **Метод.** Аналитически обобщена информация об основных государственных стандартах, применяемых для обеспечения защиты информации в АС в настоящее время. **Результат.** Рассмотрены основные особенности условий функционирования АС и определено, что уязвимости компонент обусловлены несовершенством процедур разработки и покрытия тестирования технических и программных средств. Определено, что для осуществления защиты информации в АС необходимо построение многоуровневой системы защиты с государственной аккредитацией. **Вывод.** Представлены предложения для области применения государственной стандартизации для защиты информации в АС с учетом текущего и перспективного ландшафта угроз, в том числе с учетом конструктивных особенностей (недекларированных возможностей) компонент. Преодоление угроз возможно при создании многоуровневой системы защиты информации с государственной аккредитацией.

**Ключевые слова:** автоматизированная система, защита информации, средство защиты информации, угроза, уязвимость

**Для цитирования:** А.О. Ефимов, И.И. Лившиц, М.О. Мещеряков, Е.А. Рогозин, В.Р. Романова. Об отдельных аспектах стандартизации и условий функционирования автоматизированных систем. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023; 50(4):101-108. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-4-101-108

**On certain aspects of standardization and operating conditions of automated systems**

**A.O. Efimov<sup>1</sup>, I.I. Livshits<sup>2</sup>, M.O. Meshcheryakov<sup>3</sup>, E.A. Rogozin<sup>4</sup>, V.R. Romanova<sup>5</sup>**

<sup>1,4,5</sup> Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia,

<sup>1,4,5</sup> 53 Patriotov Ave., Voronezh 394065, Russia,

<sup>2</sup> N.E. Bauman Moscow State Technical University,

<sup>2</sup> 2nd Baumanskaya St. 5, p.1, Moscow 105005, Russia,

<sup>3</sup> National Research University ITMO,

<sup>3</sup> 49 Kronverksky Ave., St. Petersburg 197101, Russia

**Abstract. Objective.** In this paper, the main aspects of the operating conditions of the AS are considered, as well as the issues of standardization of the stages of the life cycle of the AS (creation, commissioning, maintenance, etc.) at the state level. In this subject area, the technological features of building an AS based on various technical architectures are briefly considered, since both foreign processors based on x86-64 architectures and processors of domestic development based on the Advanced RISC Machine architecture are currently applicable. The use of various components of the AS requires additional study in terms of ordering the composition and configuration of specific SPI. Since each processor has a multi-level architecture, this fact objectively complicates the possibilities for full security testing and detection of all vulnerabilities. **Method.** In the course of the work, the threats and vulnerabilities of individual components of the AS from the point of view of intentional and unintentional threats are considered. The information on the main state standards applied to ensure the protection of information in the AS at the present time is summarized. **Result.** The main features of the operating conditions of the AS are considered and it is determined that the vulnerabilities of the components are due to the imperfection of the procedures for developing and covering testing of hardware and software. It is determined that in order to protect information in the AS, it is necessary to build a multi-level protection system with state accreditation. **Conclusion.** Proposals are presented for the application of state standardization for the protection of information in the AS, taking into account the current and prospective threat landscape, including taking into account the design features (undeclared capabilities) of the components. Overcoming threats is possible with the creation of a multi-level information protection system with state accreditation.

**Keywords:** automated system, information protection, information security tool, threat, vulnerability

**For citation:** A.O. Efimov, I.I. Livshits, M.O. Meshcheryakov, E.A. Rogozin, V.R. Romanova. On certain aspects of standardization and operating conditions of automated systems. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2023; 50(4):101-108. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-4-101-108

**Введение.** В настоящее время крайне актуальной является проблема использования в АС информации различной степени конфиденциальности. Для удовлетворения требований различных категорий пользователей разрабатывается значительное количество АС в различных конфигурациях, направленных на эффективное решение конкретного спектра задач в специфических областях [1–3]. Текущие тенденции развития технологий накладывают свой отпечаток на архитектуру и состав компонент в составе конкретных специализированных АС.

**Постановка задачи.** Постоянное развитие мощности вычислительных (процессорных) компонент, а также объемов хранимой информации и практически неограниченного периметра доступа множества пользователей объективно требует новых методов защиты информации.

**Методы исследования.** В основе различных технических архитектур в настоящее время применимы как зарубежные процессоры на базе архитектур Intel x86-64, так и процессоры отечественной разработки на основе архитектуры ARM (Advanced RISC Machine). Применение различных типов процессоров, операционных систем (ОС) и СЗИ также требует дополнительной проработки с точки зрения построения современной и адекватной защиты информации под государственным контролем [4 – 9].

Рассмотрим проблемы обеспечения защиты на уровне процессоров. Поскольку каждый конкретный тип процессора обладает многоуровневой архитектурой, это значительно усложняет возможности для полного тестирования функций безопасности и своевременного обнаружения уязвимостей [10,11]. В банке данных угроз безопасности информации (УБИ) ФСТЭК России представлены две УБИ, касающиеся процессоров.

Например, УБИ.209: «Угроза несанкционированного доступа к защищаемой памяти ядра процессора». Угроза заключается в возможности получения доступа к защищенной памяти из программы, не обладающей соответствующими правами, в

результате эксплуатации уязвимостей, позволяющих преодолеть механизм разграничения доступа, реализуемый центральным процессором. Реализация данной УБИ обусловлена наличием уязвимостей, связанных с ошибкой контроля доступа к памяти, основанных на спекулятивном выполнении инструкций процессора. Ошибка контроля доступа обусловлена следующими факторами: отсутствие проверки прав доступа процесса к читаемым областям при спекулятивном выполнении операций, в том числе при чтении из оперативной памяти; отсутствие очистки кэша от результатов ошибочного спекулятивного исполнения; хранение данных ядра операционной системы в адресном пространстве процесса. Реализация данной УБИ возможна из-за наличия процессоров, имеющих аппаратные уязвимости и для которых нет соответствующих обновлений [10]. Отмечается, что данный вид угроз актуален для всех видов и архитектур центрального процессора.

Рассмотрим компонент – оперативная память (Random Access Memory, RAM). В настоящее время применяется RAM 3-го поколения и может быть размещена по-разному: распаяна на плате или подключена как отдельный модуль. Поскольку RAM хранит обрабатываемую информацию различной степени конфиденциальности, она также является уязвимым элементом АС. В банке данных УБИ содержится информация об угрозе УБИ.022: «Угроза избыточного выделения оперативной памяти». Угроза заключается в возможности выделения значительных ресурсов RAM для обслуживания запросов вредоносных программ и соответственного снижения объема ресурсов RAM, доступной в АС для выделения в ответ на запросы программ легальных пользователей [10]. Данная угроза обусловлена наличием слабостей механизма контроля выделения RAM различным программам. Реализация данной угрозы возможна при условии нахождения вредоносного программного обеспечения в АС в активном состоянии.

Рассмотрим компонент – накопители (жесткие диски, твердотельные накопители (SSD), внешние или мобильные типы накопителей и пр.), которые имеют свои особенности. Поскольку они имеют определенный ресурс, то данный тип компонентов требует своевременного резервного копирования информации, а также точного соблюдения установленных условий эксплуатации. В БДУ ФСТЭК содержится (на дату 16.01.2023) более 44 тыс. уязвимостей. В качестве примера реализации уязвимости рассмотрим BDU:2022-04626: «Уязвимость микропрограммного обеспечения твердотельных накопителей Intel SSD, связанная с одновременным выполнением с использованием общего ресурса с неправильной синхронизацией, позволяющая разрушительно вызвать отказ в обслуживании». В качестве примера УБИ можно привести пример CVE-2022-38392, которая описывает отказ в обслуживании жестких дисков с частотой вращения 5400 об/мин при воздействии злоумышленников, находящихся в непосредственной близости, посредством резонансной частотной атаки считывания файла [12].

Далее рассмотрим компонент – материнскую плату, которая также не является абсолютно безопасным элементом, и по числу возможных уязвимостей ее можно назвать одним из самых уязвимых элементов. Более того, в некоторых случаях уязвимости на типовой материнской плате дополнительно могут возникать при подключении сторонних недоверенных компонентов. Рассмотрим пример угрозы материнской платы – УБИ.004: «Угроза аппаратного сброса пароля BIOS». Реализация данной угрозы основана на аппаратном сбросе пароля, установленного в BIOS/UEFI. Для реализации данной угрозы необходим физический доступ к материнской плате. Отметим, что в БДУ ФСТЭК содержится более 200 уязвимостей, затрагивающих к общему BIOS/UEFI, и 16 УБИ, эксплуатирующих описанные уязвимости конкретных компонентов. Важность рассмотрения различных компонент АС подтверждает тот факт, что каждый конкретный элемент сложной системы может обладать своими уникальными уязвимостями и УБИ, которые эти уязвимости могут эксплуатировать. Среди причин появления уязвимостей можно отметить ошибки проектирования, несовершенство цикла безопасной разработки, а также особенности физического устройства конкретных типов компонент. Вероятно, что некоторые уязвимости могут быть устранены различными способами, самым часто применяемым способом защиты является внедрение программных патчей, либо использование конкретных СЗИ.

В связи с тем, что обнаружение уязвимостей достигается, по большей части, по итогам экспертного анализа уже произошедших успешных атак на конкретные устройства, представляется целесообразным осуществление принципиального контроля защиты от несанкционированного доступа (НСД) к конкретным компонентам в составе АС.

Поскольку физический (непосредственный) и/или удаленный доступ к конкретным компонентам открывает множество уязвимостей, и, соответственно, множество векторов для реализации атак, на практике наблюдается значительное количество СЗИ различного состава и конфигурации. Несмотря на устоявшиеся и хорошо известные архитектурные решения АС, неограниченное множество компонентов аппаратных средств, ОС, встроенных и/или наложенных СЗИ, объективно приводит к известной сложности сопровождения всей совокупности программно-аппаратных компонент в составе АС. Кроме того, необходимо принять во внимание значительные риски применения тех компонент АС, которые находятся в «облаке», вне какого-либо контроля владельца АС или государственных служб, способных контролировать текущий уровень защищенности [13 – 15].

**Обсуждение результатов. Система государственных стандартов РФ в области функционирования АС.** В качестве нормативно-методической базы в РФ в области функционирования АС применяется ряд государственных стандартов [16,17]. В основе части указанных стандартов находятся зарубежные стандарты (например: ISO, IEC, IEEE или совместные), которые были приняты в национальной системе ГОСТ Р и применяются в РФ в области функционирования АС в РФ. Рассмотрим эволюцию системы государственных стандартов РФ далее на нескольких примерах.

Первый этап предлагается определять в интервале 1995 – 2007 гг., когда были приняты первичные государственные стандарты, регулирующие создание АС в защищенном исполнении (рис. 1). Указанные стандарты определили основы терминологии, основные процедуры проведения испытаний программных средств, общие теоретические сведения, необходимые для построения АС в защищенном исполнении [18,19].

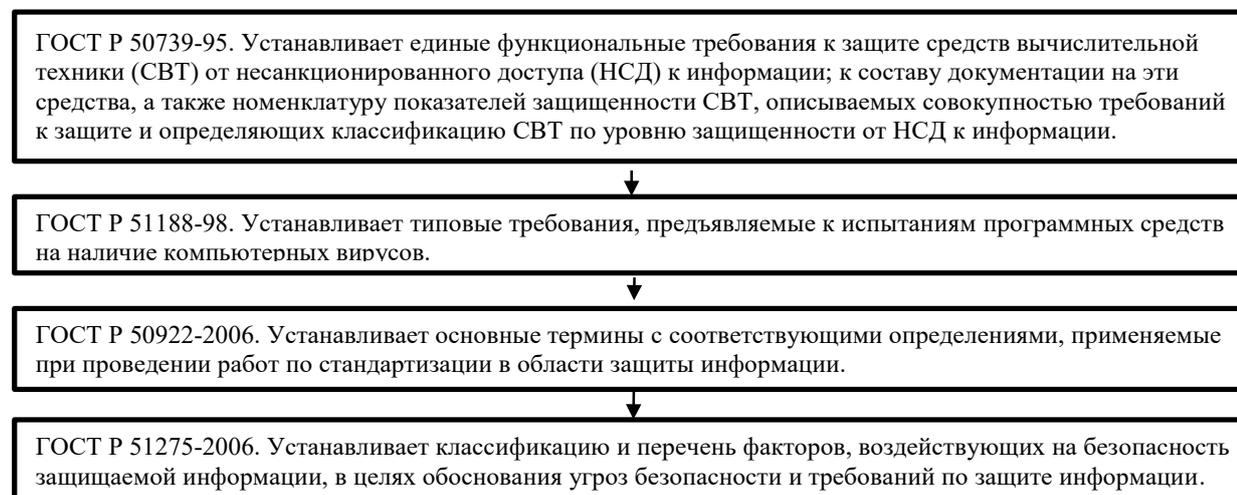


Рис. 1. Схема государственных стандартов, утвержденных в 1995 – 2006 гг.

Fig. 1. Scheme of state standards approved in 1995 – 2006.

Второй этап эволюции системы государственных стандартов предлагается определять в интервале 2007 – 2014 гг., в этот период в РФ продолжается работа по детализации конкретных требований по испытаниям, выявления скрытых каналов, этапов жизненного цикла АС в защищенном исполнении и пр. (рис. 2). В период 2005 – 2021 гг. в РФ активно развивались государственные стандарты, определяющие номенклатуру показателей качества СЗИ, средства контроля эффективности процесса защиты информации, основные термины и определения, связанные с обеспечением защиты информации (рис. 3).

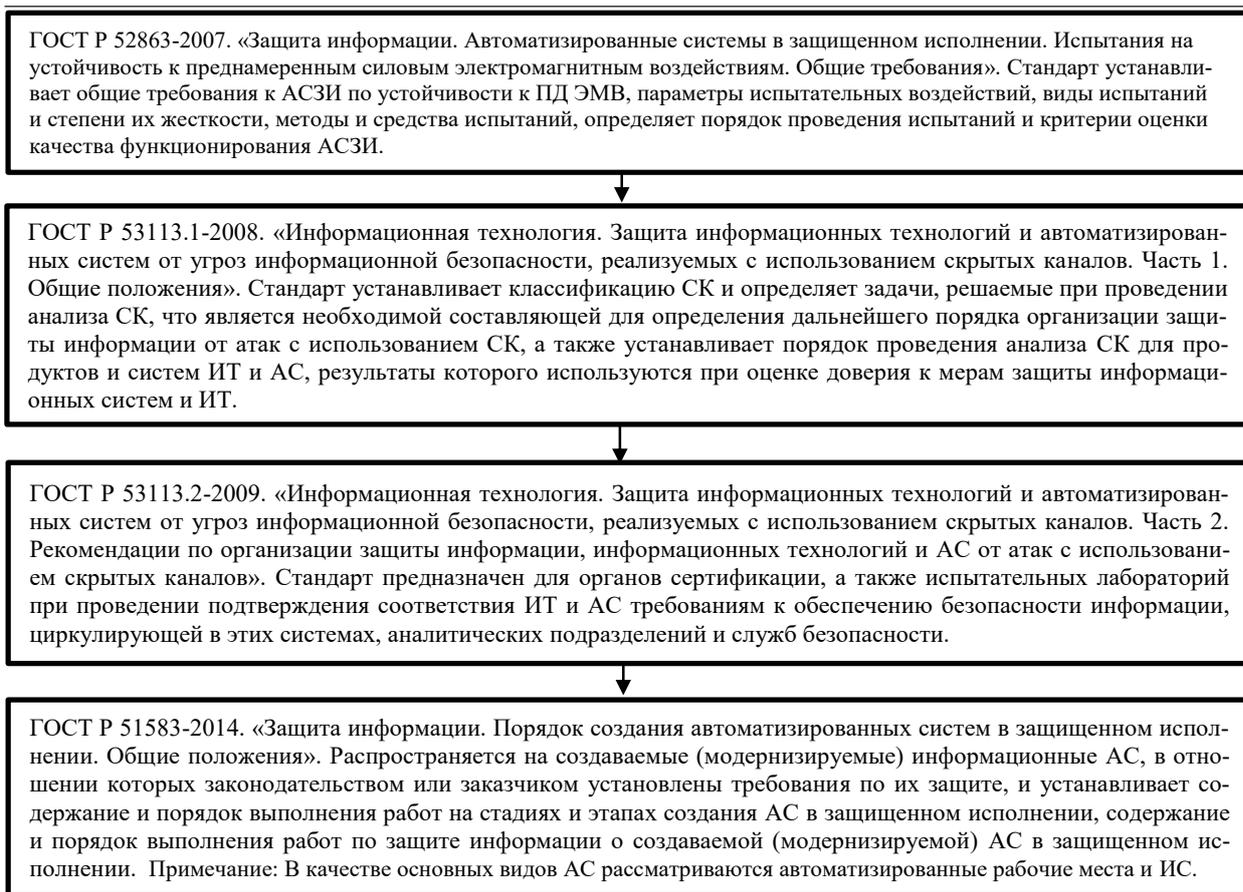


Рис. 2. Схема государственных стандартов, утвержденных в 2007 – 2014 гг.

Fig. 2. Scheme of state standards approved in 2007 – 2014.

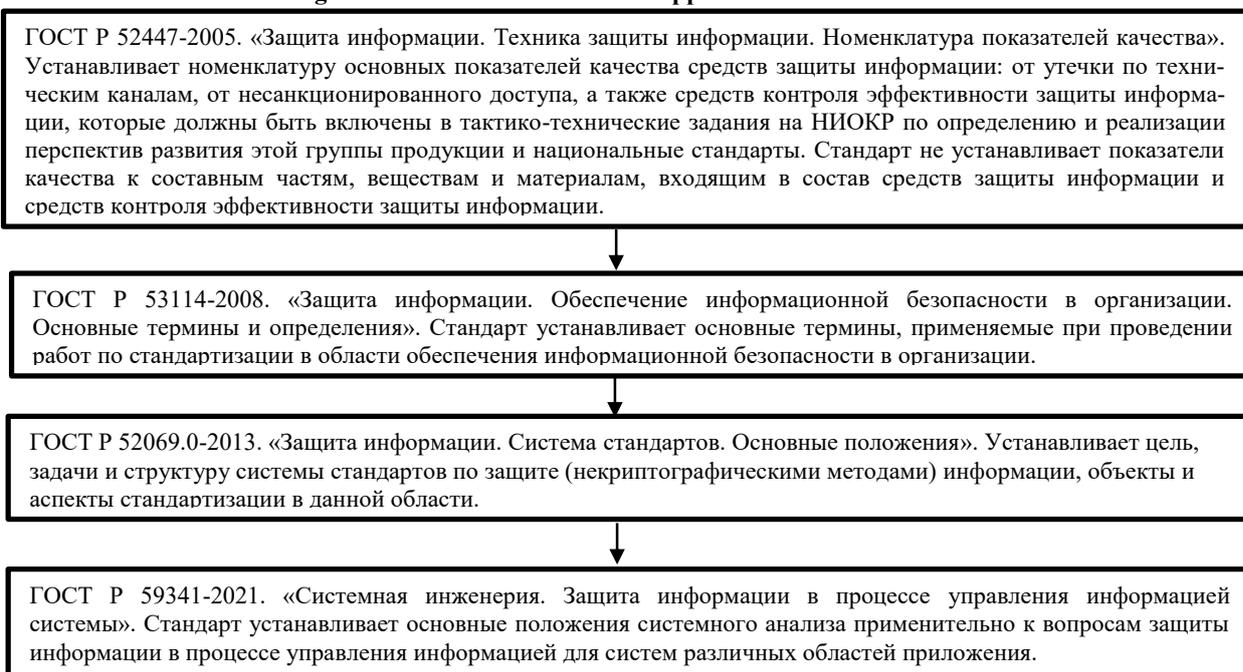
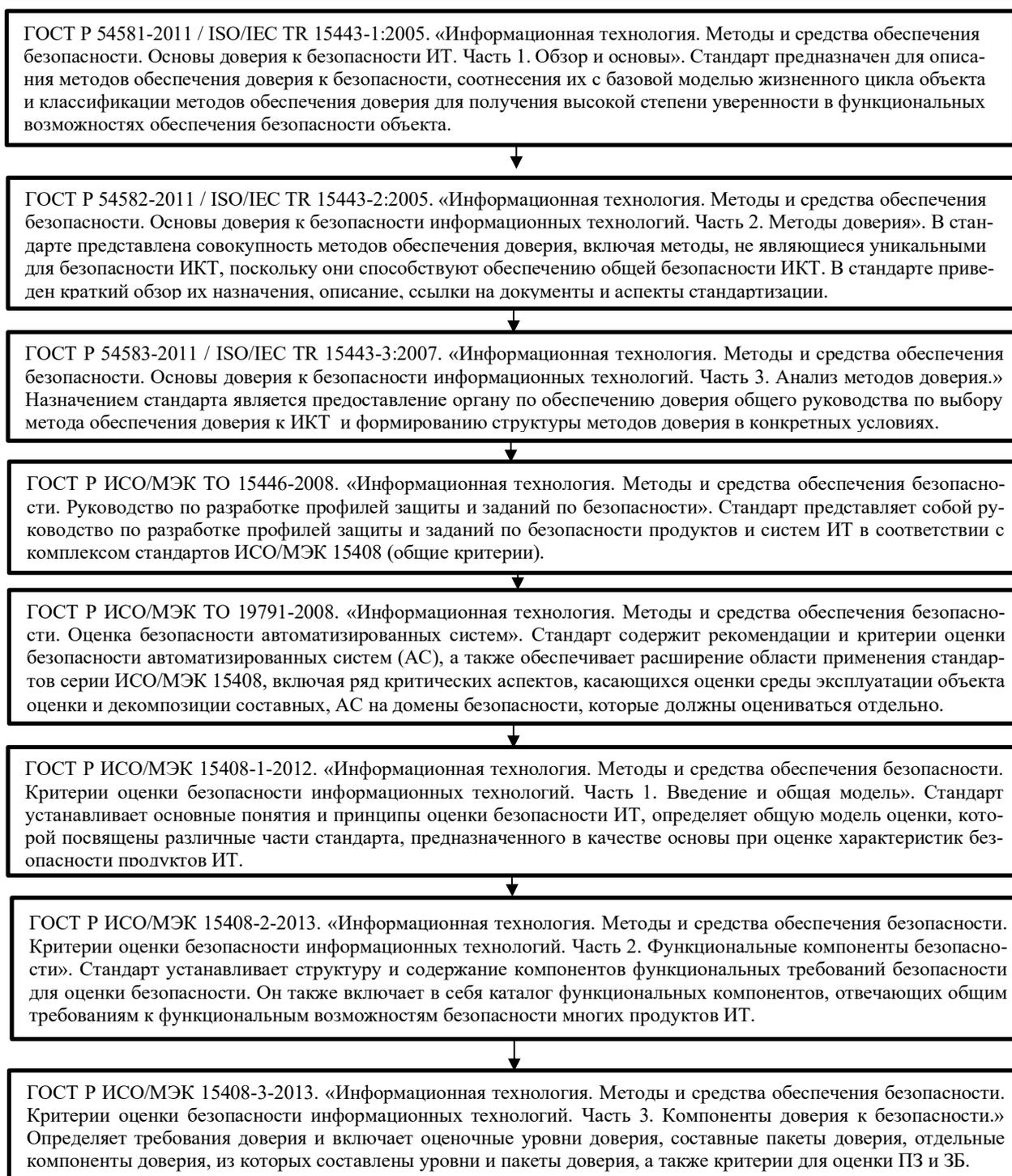


Рис. 3. Стандарты, определяющие основные термины и определения

Fig. 3. Standards defining basic terms and definitions

Отдельное внимание рекомендуется уделять национальным стандартам, которые основаны на международных стандартах ISO, IEC, IEEE и пр. Ценность идентичных стандартов (IDT), корректно переведенных и принятых в системе ГОСТ Р, определяется тем, что существенно экономится время при определении необходимых требований к АС и СЗИ. Наиболее важные стандарты ГОСТ Р ИСО/МЭК показаны на рис. 4.



**Рис. 4. Стандарты ГОСТ Р ИСО/МЭК, применяемые в сфере защиты информации в АС**

**Fig. 4. GOST R ISO/IEC standards applied in the field of information security in the AS**

Международные стандарты (на 16.01.2023 разработано и опубликовано более 24,5 тыс. только стандартов ISO [20]), позволяют объективно применять лучшую мировую экспертизу в таких областях как управление рисками (ГОСТ Р ИСО/МЭК серии 31000 и 27005), аудитов (ГОСТ Р ИСО серии 19011 и 27006), требованиями к безопасности (ГОСТ Р ИСО/МЭК серии 27001) и пр. (рис. 4).

**Вывод.** Применительно к области создания АС в защищенном исполнении существует достаточная современная нормативная база стандартизации. Состав базы применимых стандартов определяется как государственными стандартами, разработанными в РФ, так и переводами международных стандартов, принятых в национальной системе ГОСТ Р.

Применение стандарта (совокупности стандартов) определяется спецификой эксплуатации

конкретной АС, составом угроз и множеством уязвимостей, присущих различным компонентам в составе конкретной программно-аппаратной конфигурации. С учетом известных факторов риска необходимо обеспечить в перспективе жизненный цикл АС, основанный на риск-ориентированных стандартах, в том числе – оценку эффективности применения мер защиты, с целью создания национальной эффективной и современной системы обеспечения безопасности.

#### Библиографический список:

1. Об утверждении Наставления по технической эксплуатации средств связи и автоматизации территориальных органов МВД РФ: приказ МВД России от 30.11.2016 № 772. Информационно-правовой портал системы КонсультантПлюс. Режим доступа: <http://base.consultant.ru> (16.01.2023).
2. Об утверждении состава и содержания организационных и технических мер по обеспечению безопасности персональных данных при их обработке в информационных системах персональных данных: приказ ФСТЭК России от 18.02.2013 № 21 // Информационно-правовой портал системы КонсультантПлюс. – Режим доступа: <http://base.consultant.ru> (дата обращения: 16.01.2023).
3. Об утверждении Требований о защите информации, не составляющей государственную тайну, содержащейся в государственных информационных системах: приказ ФСТЭК России от 11.02.2013 № 17//Информационно-правовой портал системы КонсультантПлюс. – Режим доступа: <http://base.consultant.ru> (дата обращения: 16.01.2023).
4. ФСТЭК России. Руководящий документ. Автоматизированные системы. Защита от несанкционированного доступа к информации. Классификация автоматизированных систем и требования по защите информации.
5. ГОСТ Р 15408–2013. Методы и средства обеспечения безопасности. Критерии оценки безопасности информационных технологий. М.: Стандартинформ. 2014. 152 с.
6. ГОСТ Р 53114–2008. Защита информации. Обеспечение информационной безопасности в организации. Основные термины и определения. 2008. 22с.
7. Руководящий документ. Безопасность информационных технологий. Концепция оценки соответствия автоматизированных систем требованиям безопасности информации: ФСТЭК России, 2004 г.
8. Руководящий документ Гостехкомиссии. Безопасность информационных технологий. Критерии оценки безопасности информационных технологий: утв. пр.м Гостехкомиссии от 19.06.2002 №187.
9. Методика определения угроз безопасности информации в информационных системах: утв. ФСТЭК России. Методика оценки угроз безопасности информации: Методический документ ФСТЭК России от 05.02.2021. Информационно-правовой портал системы КонсультантПлюс. – Режим доступа: <http://base.consultant.ru> (дата обращения: 16.01.2023).
10. Банк данных угроз безопасности информации: [Электронный ресурс]. ФСТЭК России. URL: <https://bdu.fstec.ru/>. (Дата обращения: 16.01.2023).
11. ФСТЭК России. Руководящий документ. Защита от несанкционированного доступа к информации- Термины и определения. 2015 г.
12. National Vulnerability Database (NVD) CVE-2022-38392: [Электронный ресурс] URL: <https://cve.mitre.org/cgi-bin/cvename.cgi?name=CVE-2022-38392>. (Дата обращения: 16.01.2023)
13. Лившиц И.И. Метод оценивания безопасности облачных ИТ-компонент по критериям существующих стандартов // Труды СПИИРАН. 2020. Т. 19. № 2. С. 383-411.
14. Лившиц И.И., Неклюдов А.В. Суверенные информационные технологии России // Стандарты и качество. 2018. № 4. С. 68-72.
15. Лившиц И.И., Неклюдов А.В. Суверенные информационные технологии России // Стандарты и качество. 2018. № 5. С. 66-70.
16. ГОСТ Р 50922–2006. Защита информации. Основные термины и определения // М.: Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. 2006. 12 с.
17. ГОСТ Р 56546–2015. Защита информации. Уязвимости информационных систем. Классификация уязвимостей информационных систем. 2016. 8с.
18. Коцыняк М.А., Кулешов И.А., Кудрявцев А.М., Лаута О.С. Киберустойчивость ИТКС. СПб, 2015 г.
19. Каталог национальных стандартов Росстандарт: [Электронный ресурс]. М., 2022. URL: <https://www.rst.gov.ru/portal/gost/home/standarts/catalognational>. (Дата обращения: 16.01.2023).
20. International Organization for Standardization. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.iso.org/ru/standards-catalogue/browse-by-ics.html>. (Дата обращения: 16.01.2023).

#### References

1. On the approval of the Manual on the technical operation of communications and automation of territorial bodies of the Ministry of Internal Affairs of the Russia: Order 30.11.2016 No.772 . Information and legal portal of the ConsultantPlus system. – Access mode: <http://base.consultant.ru> (16.01.2023). (In Russ)
2. On the approval of the composition and content of organizational and technical measures to ensure the security of personal data during their processing in personal data information systems: Order of the FSTEC of Russia No. 21 dated 02/18/2013. Information and legal portal of the ConsultantPlus system. – Access mode: <http://base.consultant.ru> (accessed: 16.01.2023). (In Russ)

3. On approval of the Requirements for the protection of information that does not constitute a state secret contained in state information systems: Order of the FSTEC of Russia dated 11.02.2013 No17. Information and Legal portal of the ConsultantPlus system. Access mode: <http://base.consultant.ru> (date of application: 16.01.2023). (In Russ)
4. FSTEC of Russia. Guidance document. Automated systems. Protection against unauthorized access to information. Classification of automated systems and information security requirements. (In Russ)
5. GOST R 15408-2013. Methods and means of ensuring security. Criteria for assessing the security of information technologies // Moscow: Standartinform. 2014; 152. (In Russ)
6. GOST R 53114-2008. Information protection. Ensuring information security in the organization. Basic terms and definitions. 2008; 22. (In Russ)
7. Guidance document. Information technology security. The concept of assessing the compliance of automated systems with information security requirements: approved by FSTEC of Russia 2004. (In Russ)
8. Guidance document of the State Technical Commission. Information technology security. Criteria for assessing the security of information technologies: approved. By Order of the State Technical Commission No.187. 06/19/2002. (In Russ)
9. Methodology for determining threats to information security in information systems: approved by the FSTEC of Russia Methodology for assessing threats to information security: Methodological Document of the FSTEC of Russia dated 02/05/2021. Information and Legal portal of the ConsultantPlus system. – Access mode: <http://base.consultant.ru> (accessed: 16.01.2023). (In Russ)
10. Data bank of information security threats: [Electronic resource]. FSTEC of Russia. URL: <https://bdu.fstec.ru>. (Date of application: 16.01.2023). (In Russ)
11. FSTEC of Russia. Guidance document. Protection against unauthorized access to information. Terms and definitions. 2015. (In Russ)
12. National Vulnerability Database (NVD) CVE-2022-38392: [Electronic resource] URL: <https://cve.mitre.org/cgi-bin/cvename.cgi?name=CVE-2022-38392>. (Accessed: 16.01.2023)
13. Livshits I.I. Method of assessing the security of cloud IT components according to the criteria of existing standards. *Proceedings of SPIIRAN*. 2020; 19( 2): 383-411. (In Russ)
14. Livshits I.I., Neklyudov A.V. Sovereign information technologies of Russia. *Standards and quality*. 2018; 4: 68-72. (In Russ)
15. Livshits I.I., Neklyudov A.V. Sovereign information technologies of Russia *Standards and quality*. 2018; 5:66-70. (In Russ)
16. GOST R 50922-2006. Information protection. Basic terms and definitions. Moscow: Federal Agency for Technical Regulation and Metrology. 2006;12. (In Russ)
17. GOST R 56546-2015. Information protection. Vulnerabilities of information systems. Classification of vulnerabilities of information systems. 2016;8. (In Russ)
18. Kotsynyak M.A., Kuleshov I.A., Kudryavtsev A.M., Lauta O.S. Cyberstability of ITCS. St. Petersburg, 2015. (In Russ)
19. Catalog of national standards ROSSTANDART: [El.Res.]. Moscow, 2022. URL: <https://www.rst.gov.ru/portal/gost/home/standarts/catalognational>. (Accessed: 16.01.2023). (In Russ)
20. International Organization for Standardization. [electronic resource]. URL: <https://www.iso.org/ru/standards-catalogue/browse-by-ics.html>. (Accessed: 16.01.2023).

**Сведения об авторах:**

Ефимов Алексей Олегович, адъюнкт очной формы обучения; [ea.aleksei@yandex.ru](mailto:ea.aleksei@yandex.ru)

Лившиц Илья Иосифович, доктор технических наук, профессор практики, [Livshitz.i@yandex.ru](mailto:Livshitz.i@yandex.ru)

Мещеряков Михаил Олегович, студент; [mem1201@mail.ru](mailto:mem1201@mail.ru)

Рогозин Евгений Алексеевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры автоматизированных информационных систем органов внутренних дел; [evgenirogozin@yandex.ru](mailto:evgenirogozin@yandex.ru)

Романова Виктория Романовна, адъюнкт очной формы обучения; [romanovna\\_vika@inbox.ru](mailto:romanovna_vika@inbox.ru)

**Information about authors:**

Alexey O. Efimov, full-time adjunct; [ea.aleksei@yandex.ru](mailto:ea.aleksei@yandex.ru)

Ilya I. Livshits, Dr. Sci.(Eng.), Prof. of Practice; [Livshitz.i@yandex.ru](mailto:Livshitz.i@yandex.ru)

Mikhail O. Meshcheryakov, Student; [mem1201@mail.ru](mailto:mem1201@mail.ru)

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

Victoria R. Romanova, full-time adjunct; [romanovna\\_vika@inbox.ru](mailto:romanovna_vika@inbox.ru)

**Конфликт интересов/Conflict of interest.**

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

**Поступила в редакцию/ Received 30.09.2023.**

**Одобрена после рецензирования/ Reviced 19.10.2023.**

**Принята в печать/ Accepted for publication 19.10.2023.**

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ**  
**INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS**

УДК 519.711.3

DOI: 10.21822/2073-6185-2023-50-4-109-114



Оригинальная статья /Original article

**Динамическое моделирование при функционировании систем защиты  
в области обеспечения информационной безопасности**

**А.М. Конаков, А.Г. Певнева**

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

**Резюме. Цель.** Целью исследования являются определение функциональных возможностей проектирования, построения и внедрения систем защиты с учётом временного фактора. **Метод.** Проведён анализ функционального взаимодействия построения трёх последовательно взаимосвязанных динамических моделей и передачи данных между ними. **Результат.** Разработана и предложена к внедрению общая модель системы защиты и прогнозирования возможных угроз при обеспечении безопасности информации и инфраструктуры с учётом временного фактора. **Вывод.** Рассматриваемая в статье область информационной безопасности является необходимым составляющим элементом обеспечения защиты информационных ресурсов и сопутствующих систем от различных угроз. Применение основ динамического моделирования данных, процессов и структур с точки зрения времени, позволяет оценить риски и угрозы, выявить определённые существенные недостатки и устранить их, тем самым оптимизировать затраты, повысить эффективность обеспечения безопасности и уровень защиты информационной инфраструктуры в целом.

**Ключевые слова:** моделирование, моделирование времени, математическая модель, аудит информационной безопасности, нечёткая логика, анализ данных, анализ безопасности систем

**Для цитирования:** А.М. Конаков, А.Г. Певнева. Динамическое моделирование при функционировании систем защиты в области обеспечения информационной безопасности. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023; 50(4):109-114. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-4-109-114

**Dynamic modeling in the functioning of security systems in the field of information security**

**A.M. Konakov, A.G. Pevneva**

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

**Abstract. Objective.** The purpose of the study is the functionality of designing, building and implementing protection systems taking into account the time factor. **Method.** The analysis of the functional interaction of the construction of three sequentially interconnected dynamic models and data transfer between them is carried out. **Result.** A general model of the system of protection and forecasting of possible threats in ensuring the security of information and infrastructure, taking into account the time factor, has been developed and proposed for implementation. **Conclusion.** The field of information security considered in the article is a necessary component of ensuring the protection of information resources and related systems from various threats. The application of the basics of dynamic modeling of data, processes and structures in terms of time, allows you to assess risks and threats, identify certain significant shortcomings and eliminate them, thereby optimizing costs, increasing the efficiency of ensuring security

**Keywords:** modeling, time modeling, mathematical model, information security audit, fuzzy logic, data analysis, system security analysis

**For citation:** A.M. Konakov, A.G. Pevneva. Dynamic modeling in the functioning of security

systems in the field of information security. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2023; 50(4):109-114. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-4-109-114

**Введение.** Информационные технологии и сопутствующая инфраструктура является неотъемлемой составляющей современного общества и государства. Она затрагивает жизненно важные функции для общества и государства такие как экономическое и социальное развитие, а также реализация политики и мероприятий по достижению технологического суверенитета [1,2].

**Постановка задачи.** С учётом своей важности при ускоренной цифровизации, ростом влияния и объёмов создаваемой, обрабатываемой и циркулирующей информации, информационная инфраструктура постоянно подвергается рискам и угрозам от внутренних и внешних факторов, которые в случае реализации, могут приводить к негативным последствиям различной степени значимости [3,4].

В связи с этим, возникает необходимость в разработке методов и моделей анализа временного фактора, которые можно использовать при обеспечении безопасности функционирующих систем.

Разработанная модель, своими функциональными возможностями позволит повысить эффективность и «действенность» реализуемых мер защиты, оптимизировать риски и затраты на их минимизацию, а также проводить анализ полученные результатов, в целях дальнейшего улучшения систем управления информационной безопасностью в целом.

**Методы исследования.** Динамическое моделирование - процесс, представляющий собой, создание таких математических моделей, которые позволяют описать изменения объектов и явлений во времени. С точки зрения информационной безопасности (и других сфер деятельности в целом) это важный инструмент для проведения анализа и прогнозирования различных протекающих процессов, таких как технические, экономические, организационные и др [5].

Моделирование динамических процессов позволяет проводить анализ обеспечения информационной безопасности систем и инфраструктур, которые непрерывно могут изменяться во времени и в хаотичном порядке [6].

Например, если рассмотреть систему безопасности использующую такие методологии моделирования обеспечения процессов информационной безопасности как

1. «Теория игр с природой»;
2. Теоретико - множественные и матричные модели;
3. «Марковские цепи».

И расставить их в поэтапном порядке функционирования, где конечные данные одного процесса моделирования, являются исходными данными другого, то получатся следующие схемы выстроенного взаимодействия данных методологий, представленные на рис. 1,2.

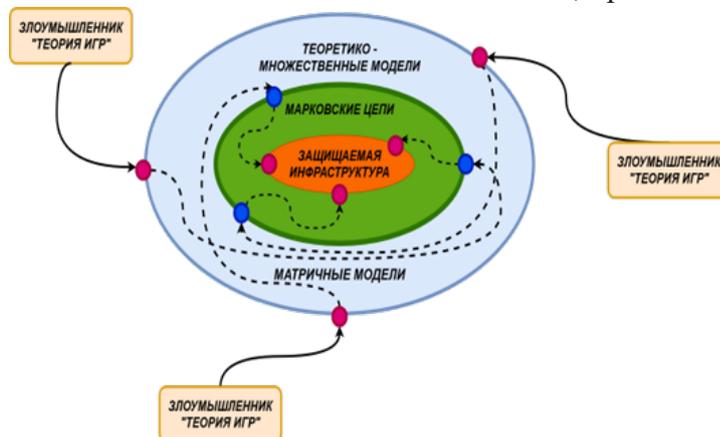


Рис. 1 Общая схема стратегий системы  
Fig. 1 General scheme of system strategies

Первым этапом моделирования процессов идёт методология «Теория игр», а точнее «Теория игр с природой», где в данном случае, природа - это функционирующая система безопасности информационной инфраструктуры, которую злоумышленнику необходимо обойти, учитывая хаотичность и неопределённый порядок изменений установок в структуре безопасности [7].



Рис. 2. Методологии моделирования процессов обеспечения информационной безопасности

Fig. 2. Methodologies for modeling information security processes

Варианты развития стратегий «Теории игр с природой» рассматриваемой системы безопасности, формируются в виде матрицы (A), где строки соответствуют известным исходным данным о функционирующей информационной инфраструктуре ( $I_{исх.}$ ), а столбцы - вероятности успеха реализации определённой последовательности действий злоумышленника ( $P_{р.усп.}$ ).

Пример такой матрица представлен ниже.

$$A = \begin{matrix} & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 1 & 15 & 55 & 45 & 25 & \dots \\ 2 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 3 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 4 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 5 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{matrix}$$

В табл. 1 представлена матрица доступа субъектов к объектам в информационной системе для следующего этапа (матричные и теоретико - множественные модели), основанная на модели безопасности «Харрисона - Руззо - Ульмана», где каждый субъект по отношению к объектам, наделен определёнными правами, а именно:

1. Ч - чтение;
2. М - модификация;
3. С - создание;
4. У - удаление;

Таблица 1. Матрица доступа субъектов к объектам системы с определёнными правами

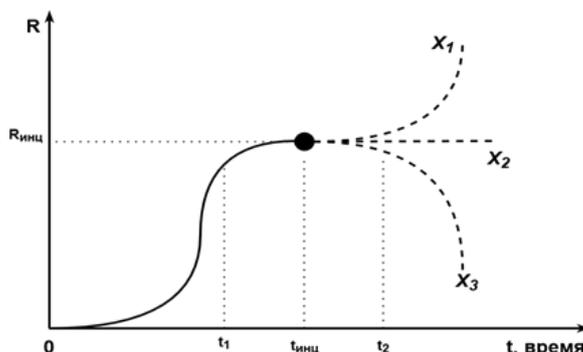
Table 1. Matrix of access of subjects to system objects with certain rights

Субъект (S)/Объект доступа (O) Subject, access object	O <sub>1</sub>	O <sub>2</sub>	O <sub>3</sub>	O <sub>4</sub>	...	O <sub>M</sub>
S <sub>1</sub>	-	ЧМС	ЧМ	-	...	-
S <sub>2</sub>	ЧМСУ	ЧМСУ	ЧМСУ	ЧМСУ	...	ЧМСУ
S <sub>3</sub>	-	ЧМСУ	-	ЧМ	...	ЧМ
S <sub>4</sub>	ЧМ	-	ЧМ	-	...	-
...	...	...	...	...	...	...
S <sub>N</sub>	-	ЧМС	-	ЧМСУ	...	ЧМ

Поведение в матрице доступа формируется и моделируется во времени на основе понятия «состояния». То есть, осуществляется переход между различными состояниями (В определённый момент времени меняются права субъекта над объектом) [8]. Изначально неизвестно, в какой момент времени у определённого субъекта изменятся права над объектом и какова вероятность наступления этого события [9, 10].

На графике (рис. 3), указана точка возможного входа злоумышленника в функционирующую информационную систему в зависимости от накопления критических ошибок (R) во времени (t), благодаря которой возникает благоприятный для злоумышленника

инцидент безопасности ( $R_{инц}; t_{инц}$ ), после которого возможно исполнение одного из нескольких вариантов развития событий ( $X_1, X_2, X_3$ ). Так как, предполагаемая точка входа злоумышленника заранее неизвестна, для её выявления, берётся определённый промежуток времени ( $[t_1; t_2]$ ) для проведения анализа данных событий безопасности информационной системы.



**Рис. 3. График точки входа злоумышленника в систему в зависимости от накопления критических ошибок во времени**

**Fig. 3. Graph of an attacker’s entry point into the system depending on the accumulation of critical errors over time**

Исходя из того, что злоумышленник на каждом этапе будет реализовывать различные варианты стратегий проникновения, отличающиеся от предыдущих, на каждом соответствующе выстроенном этапе системы используется определённые инструменты безопасности (табл. 2), позволяющие в выбранном промежутке времени, провести сканирование и дальнейший анализ полученных данных на предмет «признаков» компрометации.

**Таблица 2. Инструменты безопасности для поиска точек входа злоумышленника**  
**Table 2. Security tools for finding attacker entry points**

№	Используемая методология/ Methodology used	Используемый инструмент безопасности с учётом временного фактора/ Security tool used, taking into account the time factor
1	«Теория игр» "Game theory"	Анализ сканирования портов Анализ сканирования на различные уязвимости/ Port Scan Analysis Analysis of scans for various vulnerabilities
2	Теоретико - множественные и матричные модели/ Set-theoretic and matrix models	Анализ журнала безопасности ОС Анализ «логов» системного журнала/ OS security log analysis Analysis of system logs
3	«Марковские цепи»/ "Markov chains"	Анализ журнала средства Антивирусной защиты (САВЗ)/ Analysis of the Anti-Virus Protection Tool (AVZ) log

И в конечном итоге, исходя из проанализированных данных и сформированных процессов взаимодействия описанных методологий и их функциональных возможностей, можно сформулировать вероятность момента времени ( $P_{t_{инц}}$ ), когда проникновение злоумышленника в систему наиболее возможно в зависимости от вероятностей выбранной стратегии игр с природой ( $P_{и.с.п}$ ), изменения матрицы доступа ( $P_{и.м.д}$ ) и использования средств анализа безопасности ( $P_{и.с.а}$ ) (табл. 3).

Ее можно численно вычислить по формуле, представленной ниже:

$$P_{t_{инц}} = P_{и.с.п} * P_{и.м.д} * P_{и.с.а}$$

**Таблица 3. Вероятности использования инструментов безопасности**  
**Table 3. Probabilities of using security tools**

Процесс/ Вероятность этого процесса Process/Probability of this process	1 раз в неделю*	Чётные дни недели*	Нечётные дни недели*	1 раз в день	1-я половина дня	2-я половина дня	Не использу- ется
Сканирование портов и поиск уязвимостей Scanning ports and searching for vulnera- bilities	1	0,4	0,6	0,2	0,1	0,1	0
Анализ безопасности журнала ОС OS log security analysis	1	0,4	0,6	0,2	0,1	0,1	0
Анализ журнала Ан- тивируса Anti-Virus log analysis	1	0,4	0,6	0,2	0,1	0,1	0
Анализ «логов» си- стемного журнала Analysis of system logs	1	0,4	0,6	0,2	0,1	0,1	0

**Вывод.** В статье представлен структурный анализ существующих динамических моделей с точки зрения динамического распределения, архитектуры случайных процессов и существующих систем безопасности.

Рассмотренные модели своими функциональными возможностями, предназначены для проведения анализа и оценки рисков и угроз во времени при непрерывном функционировании систем и реализации защитных мер обеспечения безопасности на всех этапах жизненного цикла [11].

В конечном итоге, динамическое моделирование является важным инструментом в информационной безопасности критических информационных инфраструктур, который позволяет эффективно осуществлять планирование изменений, прогнозировать угрозы и атаки на информационные ресурсы, а также определять оптимальные стратегии защиты [12].

Разработка и внедрение новых методов и технологий в данной области будет способствовать улучшению безопасности информационной инфраструктуры и сокращению рисков для организаций. Это позволяет работать в условиях возможных ограничений по ресурсам, при этом эффективно реализуя функционал и возможности защитных механизмов.

**Библиографический список:**

1. Окольнишников В. В. Представление времени в имитационном моделировании //Вычислительные технологии. – 2005. – Т. 10. – №. 5. – С. 57-80.
2. Указ Президента Российской Федерации от 01.05.2022 г. № 250 «О дополнительных мерах по обеспечению информационной безопасности Российской Федерации» // URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/47796> (Дата обращения 15.05.2023);
3. Карпухин И. Н., Кораблин Ю. П., Незнанов А. А. Модели времени в имитационном моделировании //Научно-техническая информация. Серия 2: Информационные процессы и системы. – 2012. – №. 5. – С. 16-21.
4. Клочко О. С., Федорова В. А. Использование аппарата скрытых моделей Маркова при разработке системы прогнозирования функциональной безопасности информационной системы //Вопросы радиоэлектроники. – 2015. – №. 10. – С. 54-57.;
5. Щеглов К. А., Щеглов А. Ю. Марковские модели угрозы безопасности информационной системы // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2015. – Т. 58. – №. 12. – С. 957-965;
6. Щеглов А.Ю., Щеглов К.А. Математические модели и методы формального проектирования систем защиты информационных систем. Учебное пособие.– СПб: Университет ИТМО, 2015 – 93с.;
7. Прокушев Я. Е., Пономаренко С. В., Шишов Н. В. Моделирование процессов проектирования систем защиты информации в критических информационных инфраструктурах //Computational

- nanotechnology. – 2022. – Т. 9. – №. 2. – С. 45-55.
8. Пономаренко С. В., Пономаренко С. А., Прокушев Я. Е. Информационная безопасность критических систем информационной инфраструктуры. – 2021.
  9. Фоменко К. Э., Кущёв А. В. Модель обеспечения информационной безопасности элементов критической информационной инфраструктуры на основе онтологического подхода в условиях деструктивных воздействий. – 2022.
  10. Малых А. В., Юркин Д. В. Вероятностно-временные методы оценки соответствия автоматизированных систем требованиям информационной безопасности // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2017). – 2017. – С. 496-500.
  11. Котеленко С. А. Формальное описание онтологий на основе нечёткой гиперграфовой модели данных // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2005. – Т. 50. – №. 6. – С. 138-145.
  12. Максименко В. Н., Ясюк Е. В. Основные подходы к анализу и оценке рисков информационной безопасности // Экономика и качество систем связи. – 2017. – №. 2 (4). – С. 42-48.

#### References

1. Okolnishnikov V.V. Representation of time in simulation modeling. *Computing technologies*. 2005; 10(5): 57-80. (In Russ)
2. Decree of the President of the Russian Federation No. 250 dated 01.05.2022 “On additional measures to ensure information security of the Russian Federation” // URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/47796> (Date of appeal 15.05.2023); (In Russ)
3. Karpukhin I. N., Korablin Yu. P., Neznanov A. A. Time models in simulation modeling. *Scientific and technical information. Series 2: Information processes and systems*. 2012; 5: 16-21. (In Russ)
4. Klochko O. S., Fedorova V. A. The use of hidden Markov models in the development of a system for predicting the functional security of an information system. *Radio electronics issues*. 2015;10:54-57; (In Russ)
5. Shcheglov K. A., Shcheglov A. Yu. Markov models of the threat to the security of an information system. *Izvestia of higher educational institutions. Instrumentation*. 2015; 58 (12):957-965. (In Russ)
6. Shcheglov A.Yu., Shcheglov K.A. Mathematical models and methods of formal design of information systems protection systems. Textbook.– St. Petersburg: ITMO University, 2015 – 93 p.; (In Russ)
7. Prokushev Ya. E., Ponomarenko S. V., Shishov N. V. Modeling of information security system design processes in critical information infrastructures. *Computational nanotechnology*. 2022; 9(2):45-55. (In Russ)
8. Ponomarenko S. V., Ponomarenko S. A., Prokushev Ya. E. Information security of critical information infrastructure systems. 2021. (In Russ)
9. Fomenko K. E., Kushchev A.V. A model for ensuring information security of critical information infrastructure elements based on an ontological approach in conditions of destructive influences. 2022. (In Russ)
10. Malykh A.V., Yurkin D. V. Probabilistic-temporal methods for assessing the compliance of automated systems with information security requirements. *Actual problems of infotelecommunications in science and education (APINO 2017)*. 2017; 496-500. (In Russ)
11. Kotelenko S. A. Formal description of ontologies based on a fuzzy hypergraphic data model. *Izvestia of the Southern Federal University. Technical sciences*. 2005; 50(6):138-145. (In Russ)
12. Maksimenko V. N., Yasyuk E. V. Basic approaches to the analysis and assessment of information security risks. *Economics and quality of communication systems*. 2017;2 (4): 42-48. (In Russ)

#### Сведения об авторах:

Конаков Александр Михайлович, магистрант, Helium1937@yandex.ru.

Певнева Анна Геннадьевна, кандидат технических наук, доцент; pevnevaa@inbox.ru.

#### Information about authors:

Alexander M. Konakov, Master's student, Helium1937@yandex.ru.

Anna G. Pevneva, Cand. Sci. (Eng), Assoc. Prof.; pevnevaa@inbox.ru

#### Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/ Received 10.09.2023.

Одобрена после рецензирования/ Revised 11.10.2023.

Принята в печать/ Accepted for publication 11.10.2023.

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ**  
**INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS**

УДК 519. 852

DOI: 10.21822/2073-6185-2023-50-4-115-120



Оригинальная статья/ Original article

**Вычисление оценок параметров однородной вложенной кусочно-линейной регрессии**

**С.И. Носков, С.И. Белинская**

Иркутский государственный университет путей сообщения,  
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15, Россия

**Резюме. Цель.** Целью исследования является разработка алгоритма идентификации параметров однородной вложенной кусочно-линейной регрессионной модели первого типа методом наименьших модулей. **Метод.** Оценивание ее неизвестных параметров осуществляется с помощью сведения к задаче линейно-булевого программирования. Решение не должно вызывать вычислительных трудностей ввиду значительного количества эффективных программных средств – это, например, хорошо себя зарекомендовавшая и размещенная в сети Internet в свободном доступе программа LPsolve. **Результат.** Сформированная задача линейно-булевого программирования имеет приемлемую размерность для решения практических проблем моделирования. **Вывод.** Результаты решения численного примера указывают на эффективность предложенного в работе способа вычисления оценок параметров однородной вложенной кусочно-линейной регрессионной модели первого типа методом наименьших модулей.

**Ключевые слова:** однородная вложенная кусочно-линейная регрессия, идентификация параметров, метод наименьших модулей, задача линейно-булевого программирования, размерность

**Для цитирования:** С.И. Носков, С.И. Белинская. Вычисление оценок параметров однородной вложенной кусочно-линейной регрессии. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023; 50(4): 115-120. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-4-115-120

**Computing Parameter Estimates of a Homogeneous Nested Piecewise Linear Regression**

**S.I. Noskov, S.I. Belinskaya**

Irkutsk State Transport University,  
15 Chernyshevskogo St., Irkutsk 664074, Russia

**Abstract. Objective.** The aim of the study is to develop an algorithm for identifying the parameters of a homogeneous nested piecewise linear regression model of the first type by the method of least modules. **Method.** Estimation of its unknown parameters is carried out with the help of reduction to the problem of linear Boolean programming. Its solution should not cause computational difficulties due to a significant number of effective software tools - for example, the well-established and freely available program LPsolve on the Internet. **Result.** The generated linear programming problem has an acceptable dimension for solving practical modeling problems. **Conclusion.** The results of solving a numerical example indicate the effectiveness of the method proposed in the work for calculating parameter estimates for a homogeneous nested piecewise linear regression model of the first type by the method of least modules.

**Keywords:** homogeneous nested piecewise linear regression, parameter identification, least moduli method, linear boolean programming problem, dimension.

**For citation:** S.I. Noskov, S.I. Belinskaya. Computing Parameter Estimates of a Homogeneous Nested Piecewise Linear Regression. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2023; 50(4): 115-120. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-4-115-120

**Введение.** При моделировании различных сложных систем весьма часто используются конструкции, связанные с применением операций вложенности. Так, в работе [1] предлагается новый подход к решению непараметрических задач последовательного обнаружения разладки. Вложенные последовательные планы выборочного контроля позволяют использовать тест Колмогорова-Смирнова и другие непараметрические тесты для последовательного обнаружения точек разладки. Точные формулы для математического ожидания и дисперсии момента ложного обнаружения основаны на точных распределениях непараметрических статистик для малых объемов выборки.

В [2] представлены результаты исследования, расширяющего известную модель Брока и Дурлауфа, позволяя учитывать ненаблюдаемую неоднородность предпочтений между альтернативами выбора путем изучения вложенной логит-модели. При этом ослабляется предположение о глобальных взаимодействиях, и вместо этого рассматриваются локальные взаимодействия в рамках нескольких гипотетических социальных и пространственных сетевых структур.

Статья [3] посвящена использованию двухуровневой вложенной логит-модели для оценки влияния региональных стимулов на выбор местоположения новых фирм в Индии. В работе [4] представлена вложенная гибридная эволюционная модель для сокращения времени ожидания транспортных средств на светофорах и улучшения мобильности в дорожной сети. В [5] предложен подход, основанный на вложенной оптимизации, для решения задач расширения пропускной способности систем разнокачественного водоснабжения. Он должен учитывать, как будет выполняться условие удовлетворения спроса и требования к качеству воды за счет использования нескольких источников с разным качеством воды, а также временное и пространственное распределение доступных водных ресурсов и воздействие на окружающую среду.

Работа [6] посвящена планированию компьютерных экспериментов методом «черного ящика». При работе с его несколькими функциями часто возникает необходимость создавать проекты для всех черных ящиков вместе, а не по отдельности. Эти так называемые вложенные планы особенно полезны в качестве обучающих и тестовых наборов для подбора и проверки метамоделей. Кроме того, вложенные схемы могут использоваться для связывания параметров и последовательных оценок. В статье вводятся одномерные вложенные максиминные планы. Доказано, что потеря заполняемости по отношению к традиционным максиминным схемам составляет не более 14.64% и 19.21 % при вложении двух и трех конструкций соответственно.

В [7] представлена методология проксимальной вложенной выборки для объективного сравнения альтернативных байесовских моделей визуализации для приложений, которые используют изображения для принятия решений в условиях неопределенности. Методология основана на вложенной выборке и методе Монте-Карло, специально предназначенном для сравнения моделей, и использует проксимальные методы цепи Маркова для эффективного масштабирования до больших задач и работы с логарифмически вогнутыми и не обязательно гладкими моделями.

В статье [8] представлена удобная в вычислительном отношении процедура расчета критерия Вальда для вложенных гипотез. Подобно обобщенному критерию Шротера (1983), предложенная процедура не требует явного вывода ограничений, подразумеваемых нулевой гипотезой, и, следовательно, ее использование может исключить сложный этап проверки линейных и нелинейных гипотез. Показано, что традиционный критерий Вальда, обобщенный критерий Шротера и предлагаемая в статье процедура асимптотически эквивалентны. Иллюстрируется ее использование в модели динамической регрессии. В работе [9] исследуются вложенные ковариационные модели, определяемые как линейные комбинации основных ковариационных функций, которые очень популярны во многих областях прикладной статистики, в частности в геостатистике. Известным ограничением вложенных моделей является то, что константы в линейной комбинации обязаны быть

неотрицательными, чтобы сохранить положительную определенность (допустимость). В данной статье исследуются вложенные модели на  $d$ -мерных сферах. Указан точный интервал допустимости констант, входящих в линейные комбинации. В частности, показывается, что хотя бы одна константа может быть отрицательной. Одним из следствий данного факта является то, что можно получить вложенную модель, достигающую отрицательных корреляций. Приводятся теоремы характеризации для произвольных линейных комбинаций, а также для невыпуклых комбинаций, включающих две функции ковариации.

**Постановка задачи.** В работе [10] путем обобщения некоторых кусочно-линейных регрессионных моделей [11-13] введены два типа вложенных кусочно-линейных регрессий:

- вложенная кусочно-линейная регрессия первого типа:

$$y_k = \min\{\min_{i \in I^1} \{a_i^1 x_{ki}\}, \dots, \min_{i \in I^G} \{a_i^G x_{ki}\}, \max_{i \in J^1} \{\beta_i^1 x_{ki}\}, \dots, \max_{i \in J^H} \{\beta_i^H x_{ki}\}\} + \varepsilon_k, \quad (1)$$

- вложенная кусочно-линейная регрессия второго типа:

$$y_k = \max\{\min_{i \in I^1} \{a_i^1 x_{ki}\}, \dots, \min_{i \in I^G} \{a_i^G x_{ki}\}, \max_{i \in J^1} \{\beta_i^1 x_{ki}\}, \dots, \max_{i \in J^H} \{\beta_i^H x_{ki}\}\} + \varepsilon_k, \quad k = \overline{1, n} \quad (2)$$

Здесь  $k$  – номер наблюдения,  $y$  – зависимая переменная,  $x_i, i = \overline{1, m}$  – независимые переменные,  $\alpha_i^j$  и  $\beta_i^j$  – подлежащие оцениванию параметры,  $\varepsilon_k, k = \overline{1, n}$  – ошибки аппроксимации,  $n$  – количество наблюдений (длина выборки). Индексные множества  $I^i, i = \overline{1, G}, J^j, j = \overline{1, H}$  являются подмножествами множества  $\{1, 2, \dots, m\}$  и могут иметь непустые пересечения.

В [10] указано, что в формулах (1) и (2) использован первый порядок вложенности. Он может быть также вторым, третьим и т.д.

В работе [14] описаны некоторые частные формы вложенных кусочно-линейных регрессий:

- простая вложенная кусочно-линейная регрессия первого типа

$$y_k = \min\{\min_{i \in I} \{\alpha_i x_{ki}\}, \max_{i \in J} \{\beta_i x_{ki}\}\} + \varepsilon_k; \quad (3)$$

- простая вложенная кусочно-линейная регрессия второго типа

$$y_k = \max\{\min_{i \in I} \{\alpha_i x_{ki}\}, \max_{i \in J} \{\beta_i x_{ki}\}\} + \varepsilon_k; \quad (4)$$

- однородная вложенная кусочно-линейная регрессия первого типа

$$y_k = \min\{\min_{i \in I^1} \{a_i^1 x_{ki}\}, \dots, \min_{i \in I^G} \{a_i^G x_{ki}\}\} + \tilde{\varepsilon}_k; \quad (5)$$

- однородная вложенная кусочно-линейная регрессия второго типа

$$y_k = \max\{\max_{i \in J^1} \{\beta_i^1 x_{ki}\}, \dots, \max_{i \in J^H} \{\beta_i^H x_{ki}\}\} + \varepsilon_k. \quad (6)$$

Разумеется, представления (3) – (6) далеко не исчерпывают всех возможных способов конкретизации вложенных кусочно-линейных регрессий. Некоторые из таких способов отражены в [14]. Поставим задачу вычисления оценок параметров однородной вложенной кусочно-линейной регрессии первого типа (5) методом наименьших модулей (МНМ) (его описание см., например, в работах [11-13, 15]):

$$I_1(\alpha) = \sum_{k=1}^n |\tilde{\varepsilon}_k| \rightarrow \min. \quad (7)$$

**Методы исследования.** В работе [16] задача идентификации параметров простой вложенной кусочно-линейной регрессии первого типа (3) с помощью МНМ сведена к задаче линейно-булевого программирования (ЛБП) следующим образом.

Введем следующие обозначения.

$$h_k = \min_{i \in I} \{\alpha_i x_{ki}\}, k = \overline{1, n},$$

$$g_k = \max_{i \in J} \{\beta_i x_{ki}\}, k = \overline{1, n},$$

$$t_k = \min(h_k, g_k), k = \overline{1, n}.$$

Тогда указанная задача ЛБП примет следующий вид:

$$h_k \leq \alpha_i x_{ki}, k = \overline{1, n}, i \in I, \quad (8)$$

$$\alpha_i x_{ki} - h_k \leq (1 - s_{ki})M, k = \overline{1, n}, i \in I, \quad (9)$$

$$\sum_{i \in I} s_{ki} = 1, k = \overline{1, n}, \quad (10)$$

$$g_k \geq \beta_i x_{ki}, k = \overline{1, n}, i \in J, \quad (11)$$

$$\beta_i x_{ki} - g_k \geq (p_{ki} - 1)M, k = \overline{1, n}, i \in J, \quad (12)$$

$$\sum_{i \in J} p_{ki} = 1, k = \overline{1, n}, \quad (13)$$

$$t_k \leq h_k, k = \overline{1, n}, \quad (14)$$

$$t_k \leq g_k, k = \overline{1, n}, \quad (15)$$

$$h_k - t_k + Mr_k \leq M, k = \overline{1, n}, \quad (16)$$

$$g_k - t_k - Mr_k \leq 0, k = \overline{1, n}, \quad (17)$$

$$t_k + u_k - v_k = y_k, k = \overline{1, n}, \quad (18)$$

$$u_k \geq 0, v_k \geq 0, h_k \geq 0, g_k \geq 0, t_k \geq 0, k = \overline{1, n}, \quad (19)$$

$$s_{ki} \in \{0,1\}, k = \overline{1, n}, i \in I, \quad (20)$$

$$p_{ki} \in \{0,1\}, k = \overline{1, n}, i \in J, \quad (21)$$

$$r_k \in \{0,1\}, k = \overline{1, n}, \quad (22)$$

$$\sum_{k=1}^n (u_k + v_k) \rightarrow \min, \quad (23)$$

где  $M$  – заранее заданное большое положительное число.

**Обсуждение результатов.** Преобразуем задачу (8) – (23) так, чтобы новая сформированная задача ЛБП была эквивалентна задаче (7).

Введем обозначения:

$$v_{kj} = \min_{i \in I^j} \{a_i^j x_{ki}\}, k = \overline{1, n}, j = \overline{1, G},$$

$$w_k = \min_{j=1, G} v_{kj}, k = \overline{1, n}.$$

Тогда по аналогии с (8) – (23) эквивалентная (7) задача ЛБП примет вид:

$$v_{kj} \leq a_i^j x_{ki}, k = \overline{1, n}, i \in I^j, j = \overline{1, G}, \quad (24)$$

$$a_i^j x_{ki} - v_{kj} \leq (1 - s_{kij})M, k = \overline{1, n}, i \in I^j, j = \overline{1, G}, \quad (25)$$

$$\sum_{i \in I^j} s_{kij} = 1, k = \overline{1, n}, j = \overline{1, G}, \quad (26)$$

$$w_k \leq v_{kj}, k = \overline{1, n}, j = \overline{1, G}, \quad (27)$$

$$v_{kj} - w_k \leq (1 - r_{kj})M, k = \overline{1, n}, j = \overline{1, G}, \quad (28)$$

$$\sum_{j=1}^G r_{kj} = 1, k = \overline{1, n}, \quad (29)$$

$$w_k + u_k - v_k = y_k, k = \overline{1, n}, \quad (30)$$

$$s_{kij} \in \{0,1\}, k = \overline{1, n}, i \in I^j, j = \overline{1, G}, \quad (31)$$

$$r_{kj} \in \{0,1\}, k = \overline{1, n}, j = \overline{1, G}, \quad (32)$$

$$\sum_{k=1}^n (u_k + v_k) \rightarrow \min. \quad (33)$$

Решение задачи ЛБП (24) – (33) не должно вызывать вычислительных трудностей ввиду значительного количества эффективных программных средств – это, например, хорошо себя зарекомендовавшая и размещенная в сети Internet в свободном доступе программа LPsolve.

Проиллюстрируем на простом примере предложенный способ построения однородной вложенной кусочно-линейной регрессии первого типа. В качестве исходных данных возьмем выборку из [16], несколько изменив в ней вектор наблюдений для зависимой переменной:

$$X = \begin{pmatrix} 2 & 4 & 3 \\ 7 & 1 & 9 \\ 6 & 5 & 8 \\ 3 & 8 & 4 \end{pmatrix}, \quad y = \begin{pmatrix} 3 \\ 4 \\ 12 \\ 9 \end{pmatrix}.$$

Будем строить однородную кусочно-линейную регрессию первого типа с индексными множествами  $I^1$  и  $I^2$ , равными:

$$I^1 = \{1,2\}, I^2 = \{2,3\}.$$

В результате решения задачи ЛБП (24) – (33) получим следующую регрессионную модель:

$$y_k = \min\{\min\{2x_{k1}, 4x_{k2}\}, \min\{4x_{k2}, 1.5x_{k3}\} + \varepsilon_k, k = \overline{1,4}.$$

При этом некоторые вещественные переменные задачи примут значения:

$$w = (4,4,12,6),$$

$$u = (0,0,0,3),$$

$$v = (1,0,0,0).$$

Таким образом, в задаче (7)  $\sum_{k=1}^n |\tilde{\varepsilon}_k| = 4$ .

Тот факт, что  $\alpha_2^1 = \alpha_1^2$  объясняется тем обстоятельством, что вторая компонента индексного множества  $I^1$  совпадает с первой компонентой множества  $I^2$ .

**Вывод.** В работе поставлена задача идентификации параметров однородной вложенной кусочно-линейной регрессии первого типа методом наименьших модулей. Получены следующие результаты:

1. Поставленная задача сведена к задаче линейно-булевого программирования.
2. Сформированная задача ЛБП имеет приемлемую размерность для решения практических проблем моделирования.
3. Представленный подход может быть применен к расчету параметров и других форм вложенной кусочно-линейной регрессии.
4. Решен численный пример.

#### Библиографический список:

1. Lumelskii Ya. P., Feigin P. D. Nonparametric Tests and Nested Sequential Sampling Plans for Change-Point Detection // Journal of Mathematical Sciences. – 2017. – V. 221. – P. 566–579.
2. Dugundji E.R., Gulyás L. Structure and emergence in a nested logit model with social and spatial interactions // Computational and Mathematical Organization Theory. – 2013. – V. 19. – P. 151–203.
3. Ramaul N.K., Ramaul P. Regional Incentives and Location Choice of New Firms in India: A Nested Logit Model // Journal of Quantitative Economics. – 2018. – V. 16. – P. 501–525.
4. Srivastava S., Sahana K.S. Nested hybrid evolutionary model for traffic signal optimization // Applied Intelligence. – 2017. – V. 46. – P. 113–123.
5. Vieira J., Cunha M.C. Nested Optimization Approach for the Capacity Expansion of Multiquality Water Supply Systems under Uncertainty // Water Resources Management. – 2017. – V. 31. P. 1381–1395.
6. Van Dam E.R., den Hertog B.H. One-dimensional nested maximin designs // Journal of Global Optimization. – 2010. – V. 46. – P. 287–306.
7. Cai X., McEwen J.D., Pereyra M. Proximal nested sampling for high-dimensional Bayesian model selection // Statistics and Computing. – 2022. – V. 32. - Article number: 87.
8. Palm F.C., Kodde D.A. Computing Wald criteria for nested hypotheses // Statistical Papers. – 1988. – V. 29. – P. 169–190.
9. Peron A., Porcu E., Emery X. Admissible nested covariance models over spheres cross time // Stochastic Environmental Research and Risk Assessment. – 2018. – V. 32. – P. 3053–3066.
10. Носков С.И. Подход к формализации вложенной кусочно-линейной регрессии // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. - 2023. - № 1-2 (76). - С. 218-220.
11. Носков С.И., Хоняков А.А. Программный комплекс построения некоторых типов кусочно-линейных регрессий // Информационные технологии и математическое моделирование в управлении сложными системами. - 2019. - № 3 (4). - С. 47-55.
12. Носков С.И. Идентификация параметров кусочно-линейной функции риска // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. - 2017. - Т. 1. - С. 417-421.
13. Носков С.И., Лоншаков Р. В. Идентификация параметров кусочно-линейной регрессии // Информационные технологии и проблемы математического моделирования сложных систем. - 2008. - № 6. - С. 63-64.
14. Носков С.И. Некоторые формы вложенной кусочно - линейной регрессии // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. - 2023. - № 3. - С. 467-469.

15. Носков С.И., Попов Е.С., Середкин С.П., Тирских В.В., Торопов В.Д. Вариантное регрессионное моделирование производства электроэнергии в Российской Федерации // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. - 2023. - Т. 50. - № 1. - С. 123-129.
16. Носков С.И. Идентификация параметров простой формы вложенной кусочно-линейной регрессии // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. - 2023. - № 3 (67). - С. 57-61.

#### References:

1. Lumelskii Ya. P., Feigin P. D. Nonparametric Tests and Nested Sequential Sampling Plans for Change-Point Detection. *Journal of Mathematical Sciences*. 2017; 221: 566–579.
2. Dugundji E.R., Gulyás L. Structure and emergence in a nested logit model with social and spatial interactions. *Computational and Mathematical Organization Theory*. 2013;19:151–203.
3. Ramaul N.K., Ramaul P. Regional Incentives and Location Choice of New Firms in India: A Nested Logit Model. *Journal of Quantitative Economics*. 2018;16: 501–525.
4. Srivastava S., Sahana K.S. Nested hybrid evolutionary model for traffic signal optimization. *Applied Intelligence*. 2017; 46: 113–123.
5. Vieira J., Cunha M.C. Nested Optimization Approach for the Capacity Expansion of Multiquality Water Supply Systems under Uncertainty. *Water Resources Management*. 2017;31:1381–1395.
6. Van Dam E.R., den Hertog B.H. One-dimensional nested maximin designs. *Journal of Global Optimization*. 2010;46: 287–306.
7. Cai X., McEwen J.D., Pereyra M. Proximal nested sampling for high-dimensional Bayesian model selection. *Statistics and Computing*. 2022; 32- Article number: 87.
8. Palm F.C., Kodde D.A. Computing Wald criteria for nested hypotheses. *Statistical Papers*. 1988; 2: 169–190.
9. Peron A., Porcu E., Emery X. Admissible nested covariance models over spheres cross time. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. 2018; 32: 3053–3066.
10. Noskov S.I. An approach to the formalization of nested piecewise linear regression. *International Journal of the Humanities and Natural Sciences*. 2023; 1-2 (76): 218-220. (In Russ)
11. Noskov S.I., Khonyakov A.A. Software complex for constructing some types of piecewise linear regressions. *Information technologies and mathematical modeling in the management of complex systems*. 2019; 3 (4); 47-55. (In Russ)
12. Noskov S.I. Identification of the parameters of the piecewise linear risk function. *Transport infrastructure of the Siberian region*. 2017;1: 417-421. (In Russ)
13. Noskov S. I., Lonshakov R. V. Identification of parameters of piecewise linear regression. *Information technologies and problems of mathematical modeling of complex systems*. 2008; 6:63-64. (In Russ)
14. Noskov S.I. Some forms of nested piecewise linear regression. *Izvestia of the Tula State University. Technical Sciences*. 2023; 3:467-469. (In Russ)
15. Noskov S.I., Popov E.S., Seredkin S.P., Tirskikh V.V., Toropov V.D. Variant regression modeling of electricity production in the Russian Federation. *Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science*. 2023; 50( 1):123-129. DOI: 10.21822/2073-6185-2023-50-1-123-129 (In Russ)
16. Noskov S.I. Identification of parameters of a simple form of nested piecewise linear regression. *Scientific notes of the Komsomolsk-on-Amur State Technical University*. 2023; 3 (67):57-61. (In Russ)

#### Сведения об авторах:

Носков Сергей Иванович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры информационных технологий и защиты информации; [sergey.noskov.57@mail.ru](mailto:sergey.noskov.57@mail.ru)

Белинская Софья Иосифовна, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры информационных технологий и защиты информации; [sofiabel@mail.ru](mailto:sofiabel@mail.ru)

#### Information about authors:

Sergey I. Noskov, Dr. Sci. (Eng), Prof., Prof. of the Department of Information Technologies and Information Security; [sergey.noskov.57@mail.ru](mailto:sergey.noskov.57@mail.ru)

Sofia I. Belinskaya, Cand. Sci. (Physical and Mathematical), Assoc. Prof., Assoc. Prof. of the Department of Information Technologies and Information Security; [sofiabel@mail.ru](mailto:sofiabel@mail.ru)

#### Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 18.09.2023.

Одобрена после рецензирования/ Revised 20.10.2023.

Принята в печать/Accepted for publication 20.10.2023.

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ**  
**INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS**

УДК 004. 82: 004.89



DOI: 10.21822/2073-6185-2023-50-4-121-128

Оригинальная статья /Original article

**Модель интеллектуального анализа данных для исследования системы квот  
вылова водных биологических ресурсов**

**А.В. Олейникова, А.А. Олейников**

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

**Резюме. Цель.** Добыча водных биологических ресурсов является важным сектором экономики РФ. Наряду с достижением высоких экономических показателей, на которые нацелены заготовители, на первом плане кроме добычи выделяется и требование к сохранению популяций и поддержанию разнообразия видов водных биологических ресурсов. Достижение целей, устанавливаемых на основе перечисленных требований возможно за счет повышения эффективности обработки информации, получаемой из оперативных отчетов собираемых по отделам территориальных управлений. Отсутствие автоматизации обработки электронных таблиц и формирование аналитических отчетов в ручном режиме затрудняет формирование четкой обобщенной картины по состоянию отрасли. **Метод.** В настоящем исследовании использовались методы интеллектуального анализа данных анализа, анализа статистических данных. **Результат.** Разработана модель интеллектуального анализа данных для исследования системы квот вылова водных биологических ресурсов созданная в программе Logiном. **Вывод.** Разработанная модель позволяет не только оценить уровни освоения квот, но и производить прогнозирование уровней освоения с применением модуля arima, а также показывает возможность создания полноценной информационной системы учета добычи водных биологических ресурсов на ее основе.

**Ключевые слова:** водные биологические ресурсы, квота, уровень освоения, модель интеллектуального анализа данных

**Для цитирования:** А.В. Олейникова, А.А. Олейников. Модель интеллектуального анализа данных для исследования системы квот вылова водных биологических ресурсов. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023; 50(4): 121-128. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-4-121-128

**Data mining model for the study of the system of quotas for the catch  
of aquatic biological resources**

**A.V. Oleynikova, A.A. Oleynikov**

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

**Abstract. Objective.** Extraction of aquatic biological resources is an important sector of the Russian economy. Along with the achievement of high economic indicators, which are aimed at harvesters, in the foreground, in addition to production, the requirement to preserve populations and maintain the diversity of aquatic biological resources is also highlighted. Achieving the goals set on the basis of the listed requirements is possible by increasing the efficiency of processing information obtained from operational reports collected by departments of territorial administrations. The lack of automation in the processing of spreadsheets and the generation of analytical reports in manual mode makes it difficult to form a clear generalized picture of the state of the industry. **Method.** In the present study, methods of data mining analysis, analysis of statistical data were used. **Result.** A data mining model has been developed to study the system of quotas for catching aquatic biological

resources, created in the Loginom program. **Conclusion.** The developed model allows not only to estimate the levels of development of quotas, but also to predict the levels of development using the arimax module, and also shows the possibility of creating a full-fledged information system for accounting for the extraction of aquatic biological resources based on it.

**Keywords:** aquatic biological resources, quota, development level, data mining model.

**For citation:** A.V. Oleynikova, A.A. Oleynikov. Data mining model for the study of the system of quotas for the catch of aquatic biological resources. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2023; 50(4): 121-128. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-4-121-128

**Введение.** Волго-Каспийское территориальное управление Федерального агентства по рыболовству (Управление) является территориальным органом Федерального агентства по рыболовству, которое создано для осуществления функций по контролю (надзору) в области рыболовства и сохранения водных биологических ресурсов на водных объектах рыбохозяйственного значения Республики Калмыкия, Астраханской области, Волгоградской области, Саратовской области, государственному надзору за торговым мореплаванием в части обеспечения безопасности плавания судов рыбопромыслового флота в районах промысла при осуществлении рыболовства, по оказанию государственных услуг, управлению государственным имуществом в сфере рыбохозяйственной деятельности, охраны, рационального использования, изучения, сохранения, воспроизводства водных биологических ресурсов и среды их обитания, а также рыбоводства (аквакультуры), товарного рыбоводства, производства рыбной и иной продукции из водных биологических ресурсов, обеспечения безопасности плавания судов рыбопромыслового флота и аварийно-спасательных работ в районах промысла при осуществлении рыболовства, производственной деятельности на судах рыбопромыслового флота и в морских портах в отношении морских терминалов, предназначенных для комплексного обслуживания судов рыбопромыслового флота.

В сферу деятельности Управления входит также и управление водными биоресурсами, которое осуществляется с помощью контроля за распределением квот добычи, отслеживание нераспределенных остатков квот каждого пользователя между его структурными подразделениями с целью недопущения превышения квот, выделенных приказом, по каждому району, виду водных биоресурсов и типу квоты.

**Постановка задачи.** В условиях рыночной экономики необходимо минимизировать количество и упростить структуру информации таким образом, чтобы сбор данных не мешал ведению предпринимательской деятельности. Необходима разработка алгоритма системного анализа рыбохозяйственной информации, формирования стандартных аналитических форм, обеспечивающих не только суммирование уловов, но и поддержку принятия решений в области контроля за состоянием водных биоресурсов, рыбопромысловой деятельности и управления рыболовством. В настоящее время распространенным механизмом повышения эффективности работы Управления, ускорения решения проблем и повышения контроля ее деятельности, благодаря которому открываются новые подходы к решению стандартных задач, является система поддержки принятия решений (СППР). В качестве основной идеи реализации СППР предлагается использование аналитической платформы Loginom, которая является основой для создания библиотеки компонентов в области анализа данных [1,4].

Цель работы заключается в разработке модели интеллектуального анализа данных для исследования системы квот вылова водных биологических ресурсов.

**Методы исследования.** Для анализа предметной области, разработки библиотеки компонентов данных по системе квот вылова (фактического освоения) водных биологических ресурсов (ВБР) Волго-Каспийского территориального управления Федерального агентства по рыболовству предлагается использовать аналитическую платформу Loginom. Loginom предоставляет совершенно новый подход к проектированию, который ориентирован на потребности хозяйствующих субъектов разных уровней и позволяет строить модели для

интеллектуального анализа данных разной степени сложности. Применение Loginom для интеллектуального анализа данных позволяет осуществлять проектирование сверху вниз, начиная постановкой задачи исследования и заканчивая решением отдельных подзадач.

В самом начале после описания решения поставленной задачи происходит выделение независимых друг от друга подзадач. Далее аналогичным образом для формирования следующего уровня описывают подзадачи, уточняя на каждом шаге функционал проектируемого решения. Данный процесс происходит до момента выделения подзадач, решение которых является наиболее простым и очевидным и не требует дальнейшей детализации. Loginom предоставляет возможность создания сценария анализа данных, включающего все необходимые методы. В сценарий входят комбинации различных узлов обработки данных, реализующих те или иные методы. Их настраивает пользователь в соответствии с задачами исследования. А затем каждый узел в составе сценария выполняет свою функцию. Проблемам интеллектуального анализа данных посвящены работы Васильева В.В. [2], Дорофеев А.А. [5], Зеленкова Ю.А. [6], Семенова В.А. [8] и др.

**Обсуждение результатов.** Рассмотрим более подробно работу компонентов аналитического модуля на примере системы квотирования водных биологических ресурсов отдела контроля, надзора, охраны ВБР и среды обитания по Астраханской области, отдела контроля, надзора, охраны ВБР и среды обитания по Саратовской области, отдела контроля, надзора, охраны ВБР и среды обитания по Республике Калмыкия и Нижневолжского отдела контроля, надзора, охраны ВБР и среды обитания (г. Волгоград) за 2019 г. (рис.1.).

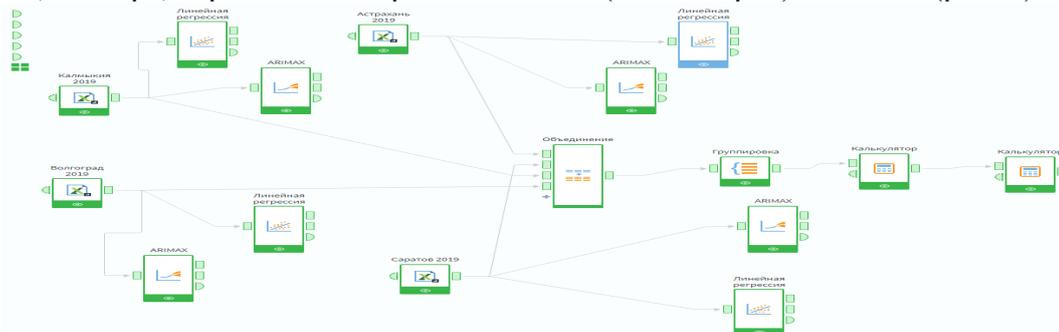


Рис. 1. Архитектура компонентов

Fig. 1. Component Architecture

Для установления зависимости между фактическим освоением в тоннах и квотой на разрабóтанный объем добычи (вылова) ВБР за каждый месяц 2019 г. по отделам Управления и по видам ВБР использовали компонент «Линейная регрессия». Регрессионный анализ помогает понять, как «типичное» значение зависимой переменной изменяется при изменении одной из независимых переменных, в то время как другие независимые переменные остаются фиксированными [3,7-10].

Регрессионная модель:

$$y = f(x, b) + \varepsilon, E(\varepsilon),$$

где,  $b$ -параметры модели,  $\varepsilon$  –случайная ошибка модели; называется линейной регрессией, если функция регрессии  $f(x, b)$  имеет вид

$$f(x, b) = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_kx_k,$$

где  $b_j$ -параметры (коэффициенты) регрессии,  $x_j$ -регрессоры (факторы модели),  $k$  — количество факторов модели.

Коэффициенты линейной регрессии показывают скорость изменения зависимой переменной по данному фактору, при фиксированных остальных факторах (в линейной модели эта скорость постоянна):

$$\forall_j b_j = \frac{\partial f}{\partial x_j} = const$$

Параметр  $b_0$ , при котором нет факторов, называют часто *константой*.

Формально — это значение функции при нулевом значении всех факторов. Для аналитических целей удобно считать, что константа — это параметр при «факторе», равном 1 (или другой произвольной постоянной, поэтому константой называют также и этот «фактор»). В таком случае, если перенумеровать факторы и параметры исходной модели с учетом этого (оставив обозначение общего количества факторов —  $k$ ), то линейную функцию регрессии можно записать в следующем виде, формально не содержащем константу:

$$f(x, b) = b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_kx_k = \sum_{j=1}^k b_jx_j = x^T b,$$

где  $x^T = (x_1, x_2, \dots, x_k)$ -вектор регрессоров,  $b = (b_1, b_2, \dots, b_k)^T$ -вектор-столбец параметров (коэффициентов).

При использовании линейной регрессии, была установлена зависимость, при которой объем фактического освоения квот от промышленного рыболовства в большей степени влияет на объем выделения квот по отделу контроля, надзора, охраны ВБР и среды обитания Астраханской области. Визуализатор Отчет по регрессии отображает параметры и результаты статистических тестов для анализа регрессионной модели (рис.2).

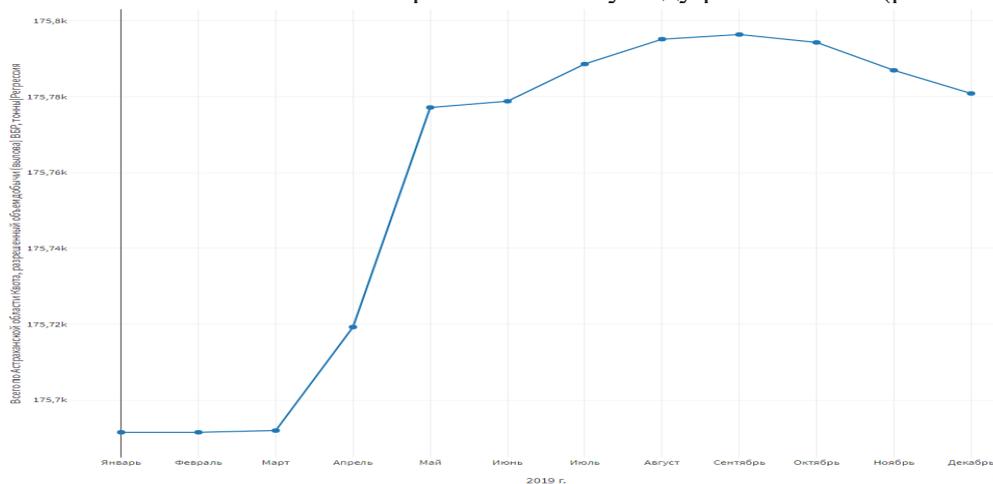
Показатель	Финансовая модель	Значение	Атрибут	Коэффициент	Стандартная ошибка	T-статистика	P
Константа	Включена	-44,996838	0.0 Константа	175,691476938	8,565017	20,512,683992	
Логарифм функции правдоподобия		0,945425	0.0 Прибрежное, промышленное рыболовство,Каспийск...	-1,379391	0,289441	-4,765712	
Коэффициент детерминации (скорр.)		0,934690	0.0 Промышленное рыболовство,Внутренние водоемы А...	-1,385786	0,294356	-4,707853	
Стандартное отклонение		12,597905	0.0 Всего по Астраханской области фактическое освоени...	1,380261	0,290554	4,750447	
Число степеней свободы ошибки		8,00					
Число степеней свободы модели		3,000000					
F-статистика		46,195909					
P-значение модели		0,000021					
Критерий Акаике		8,166140					
Критерий Акаике (скорр.)		8,642330					
Критерий Байеса		8,327775					
Критерий Ханмана-Куинна		8,196296					

Рис. 2. Отчет по регрессии Астраханской области

Fig. 2. Report on regression of the Astrakhan region

Общее качество регрессионной модели определяется с помощью коэффициента детерминации  $R^2$ . В отчете по регрессии Информация о модели его величина составляет 0,945. Поскольку максимальное значение  $R^2=1$ , что можно утверждать, что качество регрессионной модели весьма высокое (предлагаемая модель объясняет около 94,5 % дисперсии результативной переменной).

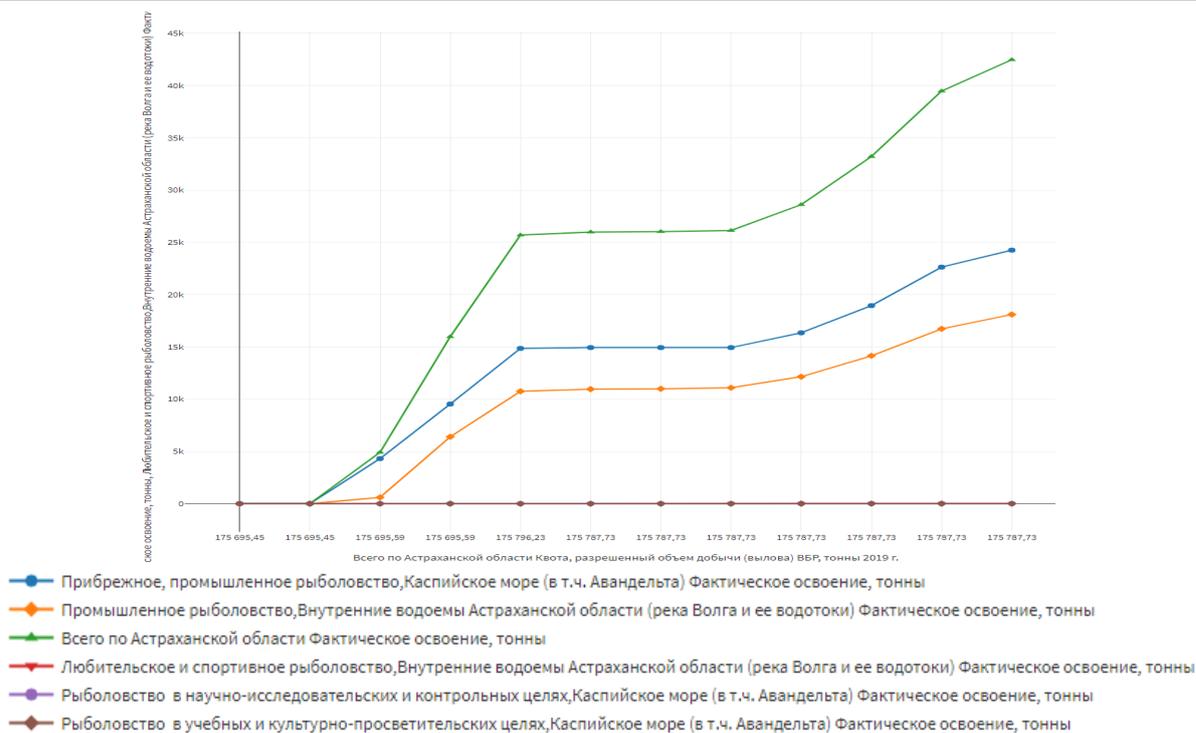
Согласно графикам линейной регрессии по уровню освоение квот можно сделать вывод, что на объем выделения квот по Астраханской области за 2019 г. влияет в большей степени объем фактического освоения квот по промышленному виду рыболовства (рис.3-4.).



—●— Всего по Астраханской области Квота, разрешенный объем добычи (вылова) ВБР, тонны|Регрессия

Рис. 3. График регрессии по Астраханской области

Fig. 3. Regression graph for the Astrakhan region



**Рис. 4. Фактическое освоение квот по видам рыболовства по Астрахани**  
**Fig. 4. Actual utilization of quotas by type of fishing in Astrakhan**

Параллельно был использован обработчик ARIMAX, с помощью которого были получены прогнозные значения объемов выделенных квот по Астраханской области. ARIMAX математическая модель для анализа временных рядов, объединяющая в себе интегрированную авторегрессию, скользящее среднее и возможность учета дополнительных внешних факторов [11]. Результирующее множество сравнено с данными фактического потребления и увидеть, при этом результат прогнозирования на основе алгоритма ARIMAX оказался более приближен к реальному (рис.5.).



**Рис. 5. Прогноз выделения квот на основе алгоритма ARIMAX по Астраханской области**  
**Fig. 5. Forecast of quota allocation based on the ARIMAX algorithm for the Astrakhan region**

Аналогичные выводы были сделаны при анализе выделения квот и их фактическим освоением за 2019 год по видам рыболовства и по отделам Волго-Каспийского территориального управления Федерального агентства по рыболовству, находящимся в

Саратовской области, Волгоградской области и Республике Калмыкия в виду схожести данных.

Так как значительное влияние на объем выделения квот по отделам Управления оказывает именно фактическое освоения промышленного рыболовства были взяты показатели фактического освоения квот по промышленному рыболовству для дальнейшего проведения анализа уровня поступления квот именно по отделам Управления. Для того чтобы выявить значимость (влияние) отдела необходимо узнать общий объем выделения квот, общий объем фактического поступления квот, общий объем освоения квот в целом по Управлению, а для этого используем компонент Loginom Объединение. После объединения значений по всем отделам Управления, производим настройку полей компонента Группировка, после чего получаем весь объем набора данных по Управлению, по отделам, по промышленному виду рыболовства, по каждому месяцу 2019 года. С помощью компонента трансформации Калькулятор, производим расчет общего объёма выделенных квот по Управлению, общего объема фактического освоения квот по Управлению, общего процента освоения по Управлению. В дальнейшем еще раз используем компонент трансформации Калькулятор для выявления значимого отдела по уровню освоения квот, проценту освоения квот и подводим итоги.

Согласно полученным данным и представленному визуализатору диаграмма столбчатая приходим к выводу, что целесообразно больше выделять квот именно на промышленное рыболовство по Астраханской области (рис.6), так как в дальнейшем от желаемого уровня выделения квот зависит обеспеченность продовольственной безопасности региона, стабильность социально-экономических процессов.

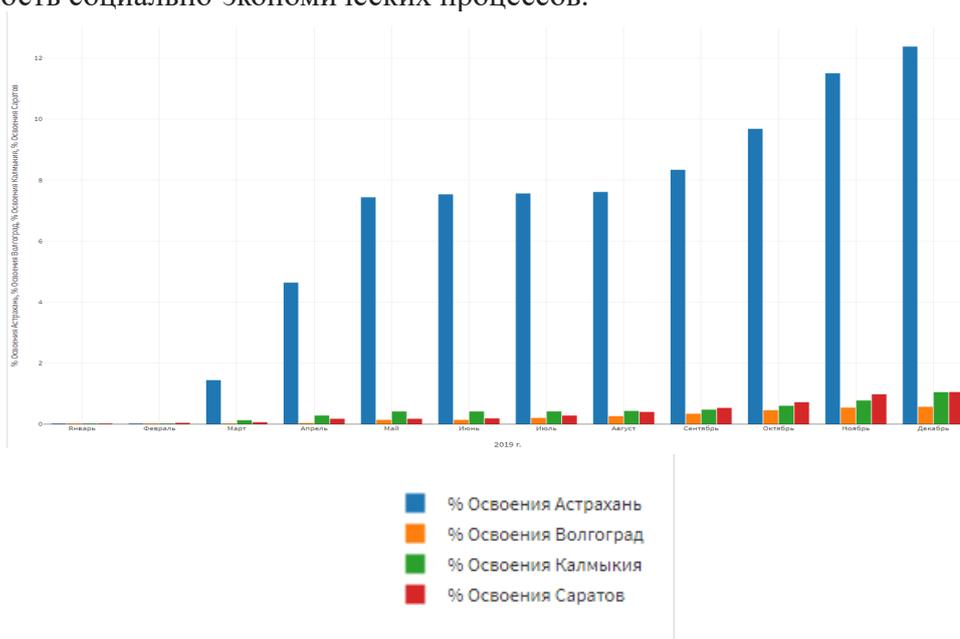


Рис. 6. Диаграмма столбчатая по % освоения квот Управления  
Fig. 6. Column chart for % of Management quota development

Традиционно добыча и переработка рыбы являлись важным средством обеспечения занятости населения Астраханской области. Поэтому резкое сокращение объемов промышленного вылова рыбы (и, как следствие, объемов ее промышленной переработки, объемов деятельности рыботорговых компаний и пр.) значительно повлияло на занятость населения (особенно в сельских районах области). Городским населением АО вылов рыбы осуществляется, в основном, в качестве одного из видов рекреационного поведения, а не как средство получения дохода или пополнения рационов. Причина – рыбу-сырец обычно дешевле купить, чем выловить самостоятельно (с учетом субъективных оценок денежных потерь, соответствующих расходам времени на обеспечение вылова и обработки рыбы, а также факторов неопределенности в отношении предполагаемых результатов любительского лова и пр.). В тоже время для сельского населения любительский лов рыбы во внутренних

водоемах и (частично) ее переработка, являются важным средством обеспечения личных пищевых рационов; получения доходов от продажи рыбы-сырца или переработанной. Рыбалка на территории Астраханской (наряду с охотой) традиционно является важным средством привлечения въездного турконтингента на территорию области.

**Вывод.** В ходе исследования была проанализирована предметная область с применением метода интеллектуального анализа данных. Для проведения интеллектуального анализа данных применялась программа Loginom.

По мере возрастания объёма данных упрощается рассмотрение их как стохастического процесса с некоторой тенденцией. Выявление закономерностей в этих данных может иметь большой потенциал благодаря комплексному применению методов анализа данных. Методы интеллектуального анализа данных основываются на таких концептуальных направлениях как математическая статистика, машинное обучение и искусственный интеллект. При этом точность выявленных моделей будет возрастать с ростом объема и разнотипности данных.

Благодаря применению данных систем можно производить визуализацию и прогнозирование в регионах не только объема выделения квот, уровня и процента освоения, но и прогнозировать социально-экономическую ситуацию в регионах. При этом с помощью интеллектуального анализа данных можно извлечь полезную информацию из больших объемов данных, которые могут быть использованы для принятия экономически оптимальных решений, повышения эффективности и качества работы в организационной структуре.

#### Библиографический список:

1. Абакумов Е.М. Сравнительный анализ алгоритмов интеллектуального анализа данных для обработки неструктурированных данных / Е. М. Абакумов, А. В. Горлов, М. Д. Кириллова, О. В. Ульянин // Физико-технические интеллектуальные системы (ФТИС-2022): Сборник трудов научно-практической конференции, Москва, 08–10 февраля 2022 года. – Москва: Буки Веди, 2022. – С. 101-106.
2. Васильев, В. В. Анализ существующих методов интеллектуального анализа неформализованных данных / В. В. Васильев // Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям. – 2009. – Т. 1. – С. 99-102.
3. Велигура, А. В. Анализ существующих методологий интеллектуального анализа данных для производственных систем / А. В. Велигура, Э. К. Мусаева // Вестник Луганского национального университета имени Владимира Даля. – 2020. – № 5(35). – С. 45-50.
4. Джамансариев, Н. Б. Сравнительный анализ программ для интеллектуального анализа данных / Н. Б. Джамансариев // Информационные технологии в науке, управлении, социальной сфере и медицине: Сборник научных трудов II Международной конференции, Томск, 19–22 мая 2015 года / Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2015. – С. 135-136.
5. Дорофеюк, А. А. Методы и алгоритмы интеллектуального анализа сложно организованных данных / А. А. Дорофеюк, Ю. А. Дорофеюк // Управление развитием крупномасштабных систем: Современные проблемы / Под редакцией А.Д. Цвиркуна. Том Выпуск 2. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью Издательская фирма «Физико-математическая литература», 2015. – С. 378-409.
6. Зеленков, Ю. А. Динамика исследований в области интеллектуального анализа данных: тематический анализ публикаций за 20 лет / Ю. А. Зеленков, Е. А. Анисичкина // Бизнес-информатика. – 2021. – Т. 15, № 1. – С. 30-46.
7. Рогоза, М. В. Многомерный анализ агрегированной численной информации с применением интеллектуального анализа данных / М. В. Рогоза // Актуальные проблемы теории и практики развития экономики региона: Материалы 2-й межвузовской студенческой научно-практической конференции, Калуга, 21 апреля 2015 года. – Калуга: Алькор Паблишерс, 2015. – С. 448-451.
8. Семенов, В. А. Анализ методов и задач интеллектуального анализа данных / В. А. Семенов, М. М. Семенова, Л. В. Мызникова // Информационные технологии, системный анализ и управление (Итсау-2021): сборник трудов XIX Всероссийской научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, Таганрог, 09–11 декабря 2021 года. – Ростов-на-Дону - Таганрог: Южный федеральный университет, 2021. – С. 209-212. – EDN GNFPQR.
9. Татур, М. М. Анализ временных рядов как элемент процесса интеллектуального анализа данных обстановки с техногенными пожарами / М. М. Татур, А. Г. Иваницкий, В. М. Проровский // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. – 2021. – № 1(49). – С. 56-68.

10. Mikheyenkova, M. A. On the Approach to Intelligent Data Analysis in the Social Sciences / M. A. Mikheyenkova // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем. – 2020. – No. 4. – P. 129-132.
11. А.В. Олейникова, А.А. Олейников. Онтологическая модель знаний как основа автоматизации процесса распределения квот добычи водных биологических ресурсов и контроля за уровнем их освоения. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023; 50(2):126-133. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-2-126-133

#### References:

1. Abakumov E.M, Gorlov A. V., Kirillova M. D., Ulyanin O. V. Comparative analysis of data mining algorithms for processing unstructured data. *Physical and technical intelligent systems (FTIS-2022): Collection of scientific papers -practical conference*, Moscow, February 08–10, 2022. - Moscow: Buki Vedi, 2022;101-106. (In Russ)
2. Vasiliev, V. V. Analysis of existing methods of data mining. *International Conference on Soft Computing and Measurements*. 2009; 1: 99-102. (In Russ)
3. Veligura, A. V., Musaeva E. K. Analysis of existing data mining methodologies for production systems. *Bulletin of the Volodymyr Dahl Lugansk National University*. 2020;5 (35): 45-50. (In Russ)
4. Dzhmansariyev, N. B. Comparative analysis of programs for data mining. *Information technologies in science, management, social sphere and medicine: Collection of scientific papers of the II International Conference*, Tomsk, May 19–22, 2015. National Research Tomsk Polytechnic University. - Tomsk: National Research Tomsk Polytechnic University, 2015; 135-136. (In Russ)
5. Dorofeyuk, A.A., Dorofeyuk Yu.A. Methods and algorithms for data mining of complexly organized data. Development management of large-scale systems: Modern problems. *Edited by A.D. Tsvirkun. Volume Issue 2. - Moscow: Limited Liability Company Publishing Company "Physical and Mathematical Literature"*, 2015; 378-409. (In Russ)
6. Zelenkov, Yu. A., Anisichkina E. A. Dynamics of research in the field of data mining: thematic analysis of publications for 20 years. *Business Informatics*. 2021; 15(1): 30-46. (In Russ)
7. Rogoza, M. V. Multivariate analysis of aggregated numerical information using data mining. *Actual problems of the theory and practice of regional economic development: Proceedings of the 2nd interuniversity student scientific and practical conference*, Kaluga, April 21 2015. - Kaluga: Alcor Publishers, 2015; 448-451. (In Russ)
8. Semenov, V. A., Semenova M. M., Myznikova L. V. Analysis of methods and tasks of data mining. Information technologies, system analysis and management (Itsau-2021): collection of works XIX All-Russian scientific conference of young scientists, graduate students and students, Taganrog, December 09–11, 2021. - Rostov-on-Don - Taganrog: Southern Federal University, 2021; 209-212. (In Russ)
9. Tatur, M. M., Ivanitsky, A. G., Prorovsky, V. M. Time series analysis as an element of the process of data mining of the situation with man-made fires. *Emergencies: prevention and liquidation*. 2021;1 (49):56-68. (In Russ)
10. Mikheyenkova, M. A. On the Approach to Intelligent Data Analysis in the Social Sciences / M. A. Mikheyenkova. Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем. 2020; 4:129-132. (In Russ)
11. A.V. Oleynikova, A.A. Oleynikov. Ontological model of knowledge as the basis for automation of the process of distribution of quotas for the extraction of aquatic biological resources and control over the level of their development. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Science. 2023; 50(2):126-133. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-2-126-133(In Russ)

#### Сведения об авторах:

Олейникова Алла Владимировна, магистрант кафедры прикладная информатика; a.oleynikova.astu@mail.ru  
Олейников Александр Александрович, кандидат технических наук, доцент, кафедра систем автоматизированного проектирования и моделирования; aleksandr6333@gmail.com

#### Information about authors:

Alla V. Oleinikova, Undergraduate of the Department of Applied Informatics, a.oleynikova.astu@mail.ru  
Alexander A. Oleinikov, Cand.Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Department of Computer-Aided Design and Modeling Systems; aleksandr6333@gmail.com

#### Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 10.09.2023.

Одобрена после рецензирования/ Revised 01.10.2023.

Принята в печать/Accepted for publication 01.10.2023.

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ**  
**INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS**

УДК 519.711.3



DOI: 10.21822/2073-6185-2023-50-4-129-138

Оригинальная статья /Original article

**Численно-аналитическое решение распределения температур во вспененной суспензии в процессе вакуумной СВЧ - сушки**

**В.В.Ткач<sup>1</sup>, Г.О. Магомедов<sup>2</sup>, А.А Шевцов<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Военный учебно – научный центр Военно – воздушных сил «Военно–воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»,

<sup>1</sup>394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54а, Россия,

<sup>2</sup>Воронежский государственный университет инженерных технологий,

<sup>2</sup>394036, г. Воронеж, проспект Революции, д. 19, Россия

**Резюме. Цель.** Технологии вакуумного обезвоживания растворов в поле СВЧ постоянно развиваются в направлении повышения энергетической эффективности процесса сушки и снижения себестоимости целевой продукции. Это научное направление в полной мере относится и к вакуумной СВЧ – сушке суспензии во вспененном состоянии. Важнейшей задачей является совершенствование математического моделирования, которое оказывает существенную помощь в исследовании тепломассообменных процессов, протекающих в вакуумных сушилках с СВЧ – энергоподводом, в проектировании новых установок и выработке эффективных режимов их эксплуатации, разработке оптимальных режимов вакуумной сушки вспененных суспензий с учетом теплофизических и электрофизических характеристик. **Метод.** Исследование основано на методах имитационного компьютерного моделирования. **Результат.** С использованием результатов ранее проведенных исследований получен математический аппарат по нахождению температуры в пенообразном продукте в процессе вакуумной СВЧ – сушки. Его отличие от существующих математических моделей заключается в возможности применения простых методов анализа дифференциальных уравнений с меньшим количеством неизвестных переменных. Предложен метод численно – аналитического решения математической модели процесса вакуумной СВЧ – сушки вспененной суспензии. На примере СВЧ – сушки вспененной соевой суспензии проведена экспериментальная проверка, которая показала удовлетворительную сходимость результатов моделирования с погрешностью 10 – 12%. **Вывод.** Исследование численных методов решения сформулированной задачи позволяет определять температуру в любой точке соевой суспензии с учетом теплофизических и электрофизических характеристик суспензии в широком диапазоне режимных параметров.

**Ключевые слова:** моделирование, вакуум, энергоподвод, СВЧ – нагрев, вспененное состояние

**Для цитирования:** В.В.Ткач, Г.О. Магомедов, А.А Шевцов. Численно-аналитическое решение распределения температур во вспененной суспензии в процессе вакуумной СВЧ – сушки. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023; 50(4):129-138. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-4-129-138

**Numerical and analytical solution of temperature distribution in foamed soy suspension during vacuum microwave drying**

**V.V. Tkach<sup>1</sup>, G.O. Magomedov<sup>2</sup>, A.A. Shevtsov<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Military Training and Research Center Air force «The Air Force Academy named after professor N.E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin»,

<sup>1</sup>54a, Stary Bolsheviks St., Voronezh 394064, Russia,

<sup>2</sup>Voronezh State University of Engineering Technology,

<sup>2</sup>19, Revolution Ave., Voronezh 394036, Russia

**Abstract. Objective.** Technologies of vacuum dehydration of solutions in the microwave field are constantly developing in the direction of increasing the energy efficiency of the drying process and reducing the cost of target products. This scientific direction fully applies to vacuum microwave drying of soy suspension in a foamed state. In this regard, the most important task is to improve mathematical modeling, which provides significant assistance in the study of heat and mass transfer processes occurring in vacuum dryers with microwave power supply; in the design of new installations and the development of effective modes of their operation; the development of optimal modes of vacuum drying foamed soy suspension, taking into account thermophysical and electrophysical characteristics. **Method.** The research is based on computer simulation methods. **Result.** Using the results of previous studies, a mathematical apparatus was obtained for finding the temperature in a foamy product during vacuum microwave drying. Its difference from existing mathematical models lies in the possibility of using simple methods for analyzing differential equations with fewer unknown variables. A method of numerical and analytical solution of a mathematical model of the process of vacuum microwave drying of foamed suspension is proposed. Experimental verification showed quite satisfactory convergence of the simulation results with an error of 10-12%. **Conclusion.** The study of numerical methods for solving the formulated problem makes it possible to determine the temperature at any point of the soybean suspension, taking into account the thermophysical and electrical characteristics of the suspension in a wide range of operating parameters.

**Keywords:** designing, vacuum, power supply, microwave heating, foamed condition

**For citation:** V.V. Tkach, G.O. Magomedov, A.A. Shevtsov. Numerical and analytical solution of temperature distribution in foamed soy suspension during vacuum microwave drying. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2023; 50(4): 129-138. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-4-129-138

**Введение.** Совершенствование математического аппарата для описания вакуумной СВЧ – сушки является предметом экспериментальных и теоретических исследований значительного числа современных ученых [1 – 16]. Анализ известных математических моделей не позволяет в полной мере решать задачи связанные с проектированием вакуумных СВЧ – сушилок и управления процессом вакуумной сушки в широком диапазоне технологических параметров.

**Постановка задачи.** В работе предлагается метод моделирования, основанный на применении простых дифференциальных уравнений с меньшим количеством переменных, позволяющий определять температуру во вспененном продукте по высоте слоя.

**Методы исследования.** На основе анализа литературных источников и с использованием результатов ранее проведенных исследований [17] получен математический аппарат, описывающий влияние волнового характера распределения СВЧ – поля по высоте вспененного слоя. Его отличие от существующих математических моделей вакуумной СВЧ – сушки заключается в возможности применения простых методов анализа систем дифференциальных уравнений с меньшим количеством неизвестных переменных.

Процесс вакуумной СВЧ – сушки описывается уравнением теплообмена, в котором поглощением тепла пенным продуктом линейно зависит от разности температур  $(T-T_0)$ :

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \alpha \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \beta \cdot (T - T_0), \quad (1)$$

где  $T$  – температура, при которой происходит вакуумная СВЧ-сушка пенного продукта; °С,  $T_0$  – температура в рабочем объеме сушилки, °С;  $x$  – координата по высоте слоя продукта,  $x \in [0; l]$ , м;  $l$  – высота слоя продукта, м;  $\alpha$  – коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/с;  $\beta$  – коэффициент теплопоглощения при вакуумной сушке, кДж/кг;  $\tau$  – время, с; с граничными условиями

$$T \Big|_{x=l} = T_w, \quad (2)$$

где  $T_w$  – температура поверхности продукта на границе с вакуумом,

$$\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = -q_0, \quad (3)$$

где  $q_0 = 0.556 \cdot 10^{-10} \varepsilon'' \nu E^2$ , – удельное количество теплоты, которое трансформируется в объеме пенообразного продукта из энергии сверхвысокочастотного электромагнитного поля и передается от поверхности, на котором он расположен к поверхности испарения, где  $\varepsilon'' = \varepsilon' \operatorname{tg} \delta$  – коэффициент диэлектрических потерь;  $\varepsilon'$  – диэлектрическая проницаемость;  $\delta$  – угол диэлектрических потерь;  $\nu$  – частота электромагнитных колебаний, Гц;  $E$  – напряженность электрического поля, В/м; и начальными условиями:

$$T \Big|_{\tau=0} = T_1, \quad (4)$$

где  $T_1$  – постоянная температура по всему объёму продукта в начале процесса сушки.

Решение системы уравнений (1) – (4) о нахождении температуры  $T$  в пенообразном продукте в процессе вакуумной сушки сведено к двум более простым задачам, о нахождении  $F_1$  и  $F_2$ :

$$\frac{\partial F_1}{\partial \tau} = \alpha \cdot \frac{\partial^2 F_1}{\partial x^2} - \beta \cdot F_1, \quad (5)$$

$$F_1 \Big|_{x=l} = 0, \quad \frac{\partial F_1}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0, \quad (6)$$

$$F_1 \Big|_{\tau=0} = T_1 - T_w - q_0(1-x). \quad (7)$$

$$\frac{\partial F_2}{\partial \tau} = \alpha \cdot \frac{\partial^2 F_2}{\partial x^2} - \beta \cdot [(T_w - T_0) - q \cdot (x-l)] - \beta \cdot F_2, \quad (8)$$

$$F_2 \Big|_{x=l} = 0, \quad \frac{\partial F_2}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0, \quad (9)$$

$$F_2 \Big|_{\tau=0} = 0. \quad (10)$$

где  $F_1$  и  $F_2$  – новые вводимые функции, полученные через замену переменных.

**Методы исследования.** Задачу (5) – (7) решали в соответствии с методом разделения переменных [18]. Для уравнения (5) искали частное решение без учета начальных условий, удовлетворяющее граничным условиям (6) в виде:

$$F_1 = F(x; \tau) = X(x) \cdot T(\tau), \quad (11)$$

где  $\tau$  – время с;  $x$  – пространственная координата по высоте слоя, м; тогда

$$\frac{\partial F}{\partial \tau} = X \cdot T', \quad \frac{\partial F}{\partial x} = X' \cdot T, \quad \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} = X'' \cdot T. \quad (12)$$

С учетом (12) уравнение (5) приведено к виду:

$$X \cdot T' = k \cdot X'' \cdot T - \beta \cdot X \cdot T. \quad (13)$$

После деления выражения (13) на произведение ( $XT$ ) получено уравнение

$$\frac{T'}{T} = k \cdot \frac{X''}{X} - \beta, \quad (14)$$

в котором произведена замена:

$$\frac{X''}{X} = -\lambda^2, \quad (15)$$

где  $\lambda$  – неизвестная постоянная, тогда

$$X'' + \lambda^2 \cdot X = 0. \quad (16)$$

с граничными условиями (6) для  $X$ :

$$X'(0) = 0, \quad X(l) = 0. \quad (17)$$

Уравнение (16) решали при  $x = e^{px}$ , для которого известно характеристическое уравнение [19]:

$$p^2 + \lambda^2 = 0, \quad (18)$$

где  $p_{1;2} = \pm i\lambda$ , – корни данного характеристического уравнения.

Тогда решение дифференциального уравнения (11) было представлено следующим образом:

$$X = A \cdot \cos \lambda x + B \cdot \sin \lambda x. \quad (19)$$

Если в (16)  $\lambda$  произвольное число, то задача (16) – (17) имела только тривиальное решение  $X = 0$  [20]. Для нахождения значения  $\lambda$  при  $X \neq 0$  была поставлена задача: найти такие значения  $\lambda = \lambda_n$ , при которых существуют нетривиальные решения однородного дифференциального уравнения (16), удовлетворяющие однородным граничным условиям (17). Вся совокупность таких значений  $\lambda_n$  и функций  $X_n(x)$  называется спектром собственных значений  $\{\lambda_n\}$  и спектром собственных функций  $\{X_n(x)\}$  [20].

Для выполнения граничных условий продифференцировано уравнение (19):

$$X' = -A \cdot \lambda \cdot \sin \lambda x + B \cdot \lambda \cdot \cos \lambda x. \quad (20)$$

Граничное условие (17) с учетом (11) и (12) приведено к виду:

$$\frac{\partial F}{\partial x} \Big|_{x=0} = X' \cdot T \Big|_{x=0} = 0. \quad (21)$$

$$F \Big|_{x=l} = X \cdot T \Big|_{x=l} = 0. \quad (22)$$

Следовательно

$$X'(0) = 0, \quad X(l) = 0. \quad (23)$$

Подставляя  $X$  из (19) и  $X'$  из (20) в (21) получено:

$$X'(0) = -A \cdot \lambda \cdot \sin(\lambda \cdot 0) + B \cdot \lambda \cdot \cos(\lambda \cdot 0) = 0. \quad (24)$$

$$B \cdot \lambda = 0, \text{ при этом } \lambda \neq 0, \text{ тогда } B = 0.$$

$$X(l) = A \cdot \cos \lambda l + 0 \cdot \sin \lambda l = 0,$$

$$A \cdot \cos \lambda l = 0, A \neq 0, \cos \lambda l = 0.$$

С использованием рядов Фурье [19] получено решение для  $\lambda$  и  $X$ :

$$\lambda = \lambda_n = (2n - 1) \cdot \frac{\pi}{2l}, \quad n = 1; 2; 3; \dots \quad (25)$$

$$X = X_n = A \cdot \cos \left[ (2n - 1) \cdot \frac{\pi}{2l} x \right]. \quad (26)$$

Преобразовано уравнение (14) при  $\lambda = \lambda_n$  с заменой  $T$  на  $T_n$ :

$$\frac{T_n'}{T_n} = \left\{ -k \left[ (2n - 1) \frac{\pi}{2l} \right]^2 - \beta \right\},$$

$$T_n' + \left\{ k \left[ (2n - 1) \frac{\pi}{2l} \right]^2 + \beta \right\} T_n = 0, \quad (27)$$

решение которого имеет вид:

$$T_n = A_n \cdot e^{-\left\{ \beta + k \left[ (2n - 1) \frac{\pi}{2l} \right]^2 \right\} t}, \quad (28)$$

где  $A_n$  – произвольные постоянные.

Из (11) найдены частные решения  $F = F_n$ :

$$F_n = A_n e^{-\left\{ \beta + k \left[ (2n - 1) \frac{\pi}{2l} \right]^2 \right\} t} \cdot \cos \left( (2n - 1) \frac{\pi}{2l} x \right), \quad (29)$$

Так как функция (29) при любом  $n$  удовлетворяла однородному дифференциальному уравнению (5) и однородным граничным условиям (6), то их сумма тоже удовлетворяла уравнению (5) с однородными граничными условиями (6) при любых значениях  $A_n$ :

$$F_1 = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot e^{-\left\{\beta+k\left[\frac{(2n-1)\pi}{2l}\right]^2\right\}t} \cos\left(2n-1\right) \frac{\pi}{2l} x. \quad (30)$$

Предполагалось что ряд (30) сходится. Доказательство сходимости подобных рядов хорошо известно [18]. Найдена постоянная  $A_n$  из начальных условий (7):

$$\sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot \cos\left(2n-1\right) \frac{\pi}{2l} x = T_1 - T_w - q_0(1-x). \quad (31)$$

Равенство (31) рассматривалось как разложение функции в правой части, т. е.  $[T_1 - T_w - q_0(1-x)]$  в ряд Фурье по собственным функциям  $\cos\left(2n-1\right) \frac{\pi}{2l} x$  на отрезке  $x \in [0, l]$ , удовлетворяющие однородным граничным условиям (23). Для их нахождения, в соответствии с теорией о собственных функциях [20], левую и правую части этого равенства умножили на  $\cos\left(2m-1\right) \frac{\pi}{2l} x$  и затем проинтегрировали по переменной  $x$  на отрезке  $[0, l]$ :

$$\int_0^l \left[ \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot \cos\left(2n-1\right) \frac{\pi}{2l} x \right] \cdot \cos\left(2m-1\right) \frac{\pi}{2l} x \cdot dx = \int_0^l [T_1 - T_w - q_0(1-x)] \cdot \cos\left(2m-1\right) \frac{\pi}{2l} x \cdot dx. \quad (32)$$

Если  $m \neq n$ , то

$$\begin{aligned} \int_0^l \cos\left(2n-1\right) \frac{\pi}{2l} x \cdot \cos\left(2m-1\right) \frac{\pi}{2l} x \cdot dx &= \frac{1}{2} \int_0^l \left[ \cos\left(n+m-1\right) \pi \frac{x}{l} + \cos\left(n-m\right) \pi \frac{x}{l} \right] \cdot dx = \\ &= \frac{\sin\left(n+m-1\right) \pi \frac{x}{l}}{2\left(n+m-1\right) \frac{\pi}{l}} + \frac{\sin\left(n-m\right) \pi \frac{x}{l}}{2\left(n-m\right) \frac{\pi}{l}} \Bigg|_0^l = 0. \end{aligned} \quad (33)$$

В случае, когда  $m = n$ , формула (33) имеет вид:

$$\int_0^l \left[ \cos^2\left(2m-1\right) \frac{\pi}{2l} x \right] \cdot dx = \frac{1}{2} \int_0^l \left[ 1 + \cos\left(2m-1\right) \frac{\pi}{l} x \right] \cdot dx = \frac{1}{2} \left[ x + \frac{\sin\left(2m-1\right) \frac{\pi}{l} x}{\left(2m-1\right) \frac{\pi}{l}} \right] \Bigg|_0^l = \frac{1}{2} l \quad (34)$$

При  $m \neq n$  все слагаемые в сумме равенства (32), учитывая (33) и (34) обращаются в ноль кроме одного при  $m = n$ . Равенство (32) с помощью (33) и (34) приведено к виду:

$$A_m \cdot \frac{1}{2} l = \int_0^l [T_1 - T_w - q_0(l-x)] \cdot \cos\left(2m-1\right) \frac{\pi}{2l} x \cdot dx. \quad (35)$$

Для вычисления интегралов в (35) использовались вспомогательные выражения

$$\int_0^l \cos\left(2m-1\right) \frac{\pi}{2l} x \cdot dx = 2l \frac{\sin\left(2m-1\right) \frac{\pi}{2l} x}{\left(2m-1\right) \pi} \Bigg|_0^l = \frac{2l}{\pi\left(2m-1\right)} \sin\left(2m-1\right) \frac{\pi}{2} = \frac{2l \cdot (-1)^{m+1}}{\pi\left(2m-1\right)} \quad (36)$$

$$\begin{aligned} \int_0^l (l-x) \cos\left(2m-1\right) \frac{\pi}{2l} x \cdot dx &= \frac{2l}{\pi\left(2m-1\right)} \int_0^l (l-x) \cdot d \left[ \sin\left(2m-1\right) \frac{\pi}{2l} x \right] = \\ &= \frac{2l}{\pi\left(2m-1\right)} \left[ (l-x) \cdot \sin\left(2m-1\right) \frac{\pi}{2l} x \Bigg|_0^l + \int_0^l \sin\left(2m-1\right) \frac{\pi}{2l} x \cdot dx \right] = \end{aligned}$$

$$\frac{2l}{\pi(2m-1)} \int_0^l \sin(2m-1) \frac{\pi}{2l} x \cdot dx = - \left[ \frac{2l}{\pi(2m-1)} \right]^2 \cdot \cos(2m-1) \frac{\pi}{2l} x \Big|_0^l = \left[ \frac{2l}{\pi(2m-1)} \right]^2. \quad (37)$$

Подставляя (36) и (37) в (35) получено:

$$A_n = (T_1 - T_w) \frac{4(-1)^{m+1}}{\pi(2m-1)} - \frac{8q_0 \cdot l}{\pi^2(2m-1)^2}. \quad (38)$$

Отсюда  $A_n$ :

$$A_n = (T_1 - T_w) \frac{4(-1)^{m+1}}{\pi(2m-1)} - \frac{8q_0 \cdot l}{\pi^2(2m-1)^2}. \quad (39)$$

Подставляя  $A_m$  из (39) в (30), выражение искомой функции  $F_1(x,t)$  получено в явном виде:

$$F_1(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} \left[ (T_1 - T_w) \frac{4(-1)^{n+1}}{\pi(2n-1)} - \frac{8q_0 \cdot l}{\pi^2(2n-1)^2} \right] \cdot e^{-\left\{ \beta + k \left[ (2n-1) \frac{\pi}{2l} \right]^2 \right\} t} \cdot \cos(2n-1) \frac{\pi}{2l} x \quad (40)$$

Нахождение функции  $F_2(x,t)$  осуществляли аналогичным образом из решения задачи (8) – (10). Данную функцию искали с разделёнными переменными, используя собственные функции  $\cos(2n-1) \frac{\pi}{2l} x$ , удовлетворяющие граничным условиям (9), тогда

$$F_2(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} M_n(t) \cdot \cos(2n-1) \frac{\pi}{2l} x, \quad (41)$$

где  $M_n$  - неизвестные функции времени  $\tau$ , с начальными условиями из (10)

$$M_n(0) = 0 \quad (42)$$

Такой вид  $F_2(x,t)$  удовлетворял граничным условиям (9), так как собственные функции  $\cos(2n-1) \frac{\pi}{2l} x$  удовлетворяют условиям (23). Выполнены начальные условия (10) для удовлетворения дифференциального уравнения (8). Неоднородное слагаемое  $[T_w - T_0 - q_0(x-l)]$  разложено в ряд Фурье по уже известным собственным функциям:

$$T_w - T_0 - q_0(x-l) = \sum_{n=1}^{\infty} B_n \cdot \cos(2n-1) \frac{\pi}{2l} x. \quad (43)$$

Данное равенство подобно выражению (31), поэтому  $B_n$  определяли по формуле (39), где  $A_m$  заменили на  $B_n$ ,  $m$  на  $n$  и  $(T_1 - T_w)$  на  $(T_w - T_0)$ :

$$B_n = (T_w - T_0) \frac{4(-1)^{n+1}}{\pi(2n-1)} + \frac{8q_0 \cdot l}{\pi^2(2n-1)^2}. \quad (44)$$

Для поиска  $M_n(t)$  подставляли  $F_2$  (41) в (8) с разложением в ряд Фурье:

$$\sum_{n=1}^{\infty} M'_n(t) \cdot \cos(2n-1) \frac{\pi}{2l} x = -k \cdot \sum_{n=1}^{\infty} M_n(t) \left[ (2n-1) \frac{\pi}{2l} \right]^2 \cdot \cos(2n-1) \frac{\pi}{2l} x - \beta \cdot \sum_{n=1}^{\infty} M_n(t) \cdot \cos(2n-1) \frac{\pi}{2l} x - \beta \cdot \sum_{n=1}^{\infty} B_n \cdot \cos(2n-1) \frac{\pi}{2l} x, \quad (45)$$

где выражение коэффициентов  $B_n$  приведены в (44).

В левой и правой частях уравнения (45) приравнивали коэффициенты перед  $\cos(2n-1) \frac{\pi}{2l} x$ :

$$M'_n + \left\{ \beta + k \left[ (2n-1) \frac{\pi}{2l} \right]^2 \right\} \cdot M_n = -\beta \cdot B_n. \quad (46)$$

Здесь относительно  $t$  и  $t$  получено линейное неоднородное дифференциальное уравнение первого порядка с постоянными коэффициентами. Его общее решение имело вид

$$M_n = -\frac{\beta \cdot B_n}{\beta + k \left[ (2n-1) \frac{\pi}{2l} \right]^2} + C_n \cdot e^{-\left\{ \beta + k \left[ (2n-1) \frac{\pi}{2l} \right]^2 \right\} t}. \quad (47)$$

С помощью начальных условий (42) найдено  $C_n$ :

$$C_n = \frac{\beta \cdot B_n}{\beta + k \left[ (2n-1) \frac{\pi}{2l} \right]^2} \quad (48)$$

Из (47) и (48) найдено

$$M_n(t) = \frac{\beta \cdot B_n}{\beta + k \left[ (2n-1) \frac{\pi}{2l} \right]^2} \left[ e^{-\left\{ \beta + k \left[ (2n-1) \frac{\pi}{2l} \right]^2 \right\} t} - 1 \right]. \quad (49)$$

Таким образом, определена функция  $F_2(x, t)$ :

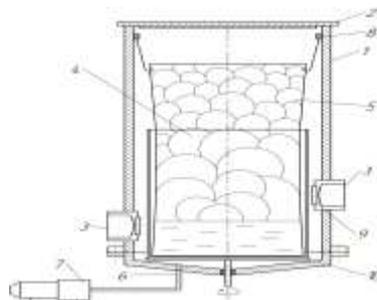
$$F_2 = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\beta \cdot B_n}{\beta + k \left[ (2n-1) \frac{\pi}{2l} \right]^2} \left[ e^{-\left\{ \beta + k \left[ (2n-1) \frac{\pi}{2l} \right]^2 \right\} t} - 1 \right] \cos(2n-1) \frac{\pi}{2l} x \quad (50)$$

С помощью (11), (19), (40), (44) и (50) записано решение всей задачи:

$$\begin{aligned} T = & (T_w + q_0 \cdot l) - q_0 \cdot x + \\ & + \sum_{n=1}^{\infty} \left[ (T_1 - T_w) z - \frac{8q_0 \cdot l}{\pi^2 (2n-1)^2} \right] \cdot e^{-\xi \cdot t} \cdot \cos \alpha x + \\ & + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\beta}{\xi} \left\{ (T_w - T_0) \cdot z + \frac{8q_0 \cdot l}{\pi^2 (2n-1)^2} \right\} \times [e^{-\xi \cdot t} - 1] \cdot \cos \alpha x, \end{aligned} \quad (51)$$

$$\text{где } \beta + k \left[ (2n-1) \frac{\pi}{2l} \right]^2 = \xi, \quad (2n-1) \frac{\pi}{2l} = \alpha, \quad \frac{4(-1)^{n+1}}{\pi \cdot (2n-1)} = z.$$

**Обсуждение результатов.** Для сравнения данных, полученных по модели (51) с экспериментальными, проводили исследования на опытной вакуумной СВЧ – установке [7] (рис.1).

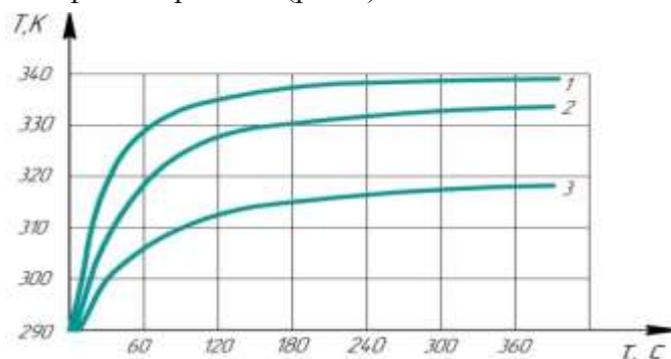


**Рис. 1. Опытная вакуумная СВЧ – установка**  
**Fig. 1. Experimental vacuum microwave installation**

Установка состоит из корпуса 1, крышки с анти – конденсатным покрытием 2, СВЧ – излучателей 3, камеры 4, емкости для продукта 5, патрубка для подключения вакуумной системы 6, вакуумной системы 7, элементов крепления 8, технологических отверстий 9, поворотной платформы 10.

В качестве объекта исследований использовалась соевая суспензия в следующих диапазонах изменения режимных параметров:  $N_{\text{свч}}=600 - 2400$  Вт;  $P_{\text{вак}}=700$  Па;  $m=0,5 - 4$  кг.

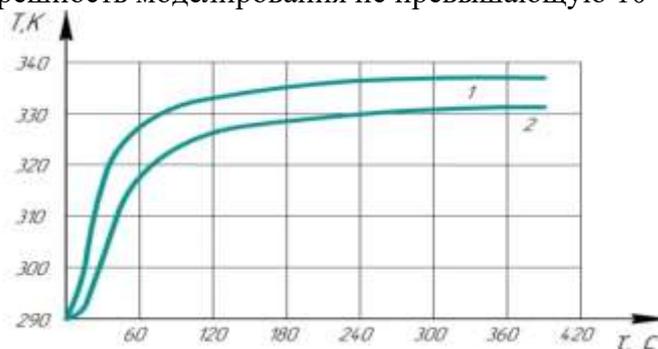
При этом учитывались теплофизические и электрофизические характеристики соевой суспензии. По экспериментальным данным построена зависимость изменения температуры от времени  $T=f(\tau)$  в середине слоя материала при  $x = l/2$ , в зоне контакта с поверхностью при  $x = 0$ , на поверхности материала при  $x = l$  (рис.2).



**Рис. 2. Зависимость температуры материала от времени по высоте слоя**  
 $N=2400$  Вт,  $P_{\text{вак}}=700$  Па,  $m=4$  кг

**Fig. 2. Dependence of the temperature of the material on the height of the layer**  
 $N=2400$  W,  $P_{\text{vac}}=700$  Pa,  $m=4$  kg

Численные расчеты на ЭВМ в среде Mathematica по формуле (51) позволили построить расчетные кривые изменения температуры в соевой суспензии и сопоставить их с экспериментальными кривыми (рис.3). Сравнение экспериментальных и математических данных показало погрешность моделирования не превышающую 10 – 12%.



**Рис. 3. Экспериментальная (1) и расчетная (2) кривые температуры**  
**Fig. 3. Experimental and calculated temperature curve**

**Вывод.** Исследование численных методов решения сформулированной задачи позволяет определять температуру в любой точке соевой суспензии с учетом теплофизических и электрофизических характеристик суспензии в широком диапазоне режимных параметров.

#### Библиографический список:

1. Журавлев А. В. Разработка конструкции вихревой сушильной камеры с СВЧ – энергоподводом [Текст] / А. В. Журавлев, Д. А. Казарцев, И. С. Юрова, Э. В. Рязских, Е. С. Бунин / Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. – 2014. – № 4 (4). – С. 68 – 74.
2. Хвостов А. А. Математическое обеспечение процесса вакуумной СВЧ – сушки как предначальная стадия создания САПР сушилок нового поколения [Текст] / А.А. Хвостов, В.И. Рязских, А.А. Шевцов, В.В. Ткач. / Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. Том 49, №3, 2022. – С. 104 – 115.
3. Пат. № 2544406 РФ, МПК F26B 17/10, 3/347. Аппарат для сушки дисперсных материалов в закрученном потоке теплоносителя с СВЧ – энергоподводом [Текст] / Д. А. Казарцев, С. Т. Антипов, А. В. Журавлев, Д. А. Нестеров, А. В. Бородкина. – заявитель и патентообладатель: Воронеж. гос. ун – т. инж. технол. – № 2013150692, заявл. 14.11.2013, опубл. 20.03.2015. Бюл. № 8.
4. Пат. № 2425311 РФ, МПК F26B 17/10, 3/347. Вихревая сушильная камера для сушки дисперсного материала в закрученном потоке теплоносителя с СВЧ – энергоподводом [Текст] / С. Т. Антипов, Д. А. Казарцев, А. В. Журавлев, Е. С. Бунин, А. Ю. Баранов, И. С. Юрова. – заявитель и патентообладатель: Воронеж. гос. технол. акад. № 2010115946, заявл. 21.04.2010, опубл. 27.07.2011. Бюл. № 21.
5. Пат. № 2444689 РФ, МПК F26B 25/22. Способ автоматического управления процессом сушки пищевых продуктов в ленточной сушилке с использованием конвективного и СВЧ – энергоподвода / С. Т. Антипов, Д. А. Казарцев, А. В. Журавлев, Т. В. Калинина, И. С. Юрова, А. Б. Емельянов. –

- заявитель и патентообладатель: Воронеж. гос. технол. акад. – № 2010135851, заявл. 26.08.2010, опубл. 10.03.2012. Бюл. № 7.
6. Пат. на пол. модель № 159476 РФ, МПК G01R 21/02. Устройство для измерения удельной мощности электромагнитного поля СВЧ в объеме заполненным сыпучим либо жидким материалом [Текст] / Д. А. Будников, А. Н. Васильев, А. А. Васильев, А. А. Цымбал. – Заявитель и патентообладатель. – Федеральное государственное бюджетное научное Учреждение Всероссийский научно – исследовательский институт электрификации сельского хозяйства. – № 2015143412/28, заявл. 13.10.2015; опубл. 10.02.2016. Бюл. № 4.
  7. Пат. № 2755850 РФ, МПК F26B 9/06. Установка для вакуумной сушки [Текст] / С. В. Макеев, Е. С. Бунин, А. А. Шевцов, В. В. Ткач. – заявитель и патентообладатель: Воронеж. гос. ун – т. инж. технол. – № 2020141027, заявл. 14.12.2020, опубл. 22.09.2021. Бюл. № 27.
  8. Пат. № 2784271 РФ, МПК 26B 15/04. Вакуумная СВЧ – установка карусельного типа [Текст] / В. В. Ткач, А. А. Шевцов, И. Н. Тарашенко, А. М. Журавлев. – заявитель и патентообладатель: Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования "Военный учебно-научный центр Военно – воздушных сил "Военно – воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина" (г. Воронеж) Министерства обороны Российской Федерации. – № 2021361133, заявл., 07.12.2021, опубл. 23.12.2022. Бюл. № 33.
  9. Пат. на пол. модель № 72536 РФ, МПК F26B 5/06 (2006.01). Вакуумная СВЧ – установка для лабораторных исследований процесса обезвоживания пищевых сред [Текст] /Г.О. Магомедов, С.В. Шахов, М.Г. Магомедов, В.В. Ткач, В.В. Новиков. – заявитель и патен-тообладатель: Г.О. Магомедов, С.В. Шахов, М.Г. Магомедов, В.В. Ткач, В.В. Новиков. – № 2007145105/22; заявл. 04.12.2007; опубл. 20.04.2008. Бюл. № 11.
  10. Orsat V., Vijaya G.S. Raghavan. Microwave technology for food processing. The Microwave Processing of Foods, July 2005, pp.105 – 118.
  11. Tong T.H., Lund, D.B. Microwave Heating of Baked Dough Products with Simultaneous Heat and Moisture Transfer. Journal of Food Engineering 19 (1993), 319 – 339 – 286.
  12. Bandita V. B, Sandeep J. Role of Food Microwave Drying in Hybrid Drying Technology. A Comprehensive Review of the Versatile Dehydration Processes, 2022, pp. 1 – 11.
  13. Bhargav K., Navnitkumar K. D. Drying of Food Materials by Microwave Energy. International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences 9 (5): May 2020, pp.1950 – 1973.
  14. Pere C., Rodier E. Microwave vacuum drying of porous media: Experimental study and qualitative considerations of internal transfers. Chemical Engineering and Processing 41 (5), May 2002, pp. 427 – 436.
  15. Лыков А.В. Теория сушки / А. В. Лыков. – М.: Энергия, 1968. – 472 с.
  16. Рудобашта С.П. Математическое моделирование процесса сушки дисперсных материалов [Текст] / С. П. Рудобашта / Известия Академии наук. Энергетика. – 2000. – № 4. – С. 98 – 109.
  17. Ткач В.В. Постановка задачи моделирования процесса вакуумной СВЧ – сушки для определения температурных полей во вспененных суспензиях [Текст] / В. В. Ткач, Г. О. Магомедов, А. А. Шевцов// Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. Том 50, №2, 2023– С. 153–159.
  18. Шипачев В.С. Высшая математика: Учеб. для немет. спец. вузов / Под ред. акад. А.Н. Гихонова. – 2-е изд., стер. М.: Высш. шк, 1990. – 479 с., ил.
  19. Тихонов А.Н., Васильева А.Б., Свешников А.Г. Дифференциальные уравнения: Учебник для вузов. – 5-е изд., – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005.
  20. Холодова С.Е., Перегудин С.И. Специальные функции в задачах математической физики. – СПб: НИУ ИТМО, 2012. – 72 с.

#### References

1. Zhuravlev A.V. Development of the design of a vortex drying chamber with a microwave energy supply. A.V. Zhuravlev, D. A. Kazartsev, I. S. Yurova, E. V. Ryazhskikh, E. S. Bunin. *Technologies of the food and processing industry of the agro-industrial complex - healthy food products*. 2014;4 (4) 68-74. (In Russ)
2. Khvostov A. A. Mathematical support of the vacuum microwave drying process as a pre-initial stage of creating CAD dryers of a new generation [Text]. A.A. Khvostov, V.I. Ryazhskikh, A.A. Shevtsov, V.V. Tkach. *Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences*. 2022; 49(3):104-115.(In Russ)
3. Pat. No. 2544406 of the Russian Federation, IPC F26B 17/10, 3/347. Apparatus for drying dispersed materials in a swirling coolant flow with a microwave power supply [Text] / D. A. Kazartsev, S. T. Antipov, A.V. Zhuravlev, D. A. Nesterov, A.V. Borodkina. – applicant and patent holder: Voronezh State University T. eng. technol. No. 2013150692, declared on 14.11.2013, published on 20.03.2015. Byul. No. 8. (In Russ)
4. Pat. No. 2425311 of the Russian Federation, IPC F26B 17/10, 3/347. Vortex drying chamber for drying dispersed material in a swirling coolant flow with a microwave power supply [Text] S.T. Antipov, D.A. Kazartsev, A.V. Zhuravlev, E.S. Bunin, A. Yu. Baranov, I.S. Yurova. applicant and patent holder: Voronezh. gos.technol.acad. No.2010115946, application No.21.04.2010, publ.27.07.2011.Byul.No.21.(In Russ)
5. Pat. No. 2444689 of the Russian Federation, IPC F26B 25/22. A method for automatic control of the drying

- process of food products in a belt dryer using convective and microwave power supply. S. T. Antipov, D. A. Kazartsev, A.V. Zhuravlev, T. V. Kalinina, I. S. Yurova, A. B. Emelyanov. applicant and patent holder: Voronezh.gos.technol.acad.No.2010135851, application.26.08.2010, publ.10.03.2012. Byul.No.7. (In Russ)
6. Pat. on the floor. Model No. 159476 RF, IPC G01R 21/02. A device for measuring the specific power of the microwave electromagnetic field in a volume filled with bulk or liquid material [Text] / D. A. Budnikov, A. N. Vasiliev, A. A. Vasiliev, A. A. Tsymbal. – Applicant and patent holder. – Federal State Budgetary Scientific Institution All – Russian Research Institute of Electrification of Agriculture. – No. 2015143412/28, declared on 13.10.2015; published on 10.02.2016. Byul. No. 4. (In Russ)
  7. Pat. No. 2755850 of the Russian Federation, IPC F26B 9/06. Installation for vacuum drying [Text] / S.V. Makeev, E. S. Bunin, A. A. Shevtsov, V. V. Tkach. – applicant and patent holder: Voro-nezh. gos. un – t. eng. technol. – No. 2020141027, declared on 12/14/2020, published on 09/22/2021. Byul. No. 27. (In Russ)
  8. Pat. No. 2784271 of the Russian Federation, IPC 26B 15/04. Vacuum microwave installation of the carousel type [Text] / V. V. Tkach, A. A. Shevtsov, I. N. Tarashchenko, A.M. Zhuravlev. – applicant and patent holder: Federal State State-owned Military Educational Institution of Higher Education "Military Training and Research Center of the Air Force "Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Garin" (Voronezh) of the Ministry of Defense of the Russian Federation. – No. 2021361133, application, 07.12.2021, publ. 23.12.2022. Byul. No. 33. (In Russ)
  9. Pat. on the floor. Model No. 72536 RF, IPC F26B 5/06 (2006.01). Vacuum microwave installation for laboratory studies of the process of dehydration of food media [Text] /G.O. Magomedov, S.V. Shakhov, M.G. Magomedov, V.V. Tkach, V.V. Novikov. – applicant and patent holder: G.O. Magomedov, S.V. Shakhov, M.G. Magomedov, V.V. Tkach, V.V. Novikov. – No. 2007145105/22; application 04.12.2007; publ. 20.04.2008. Byul. No. 11. (In Russ)
  10. Orsat V., Vijaya G.S. Raghavan. Microwave technology for food processing. The Microwave Processing of Foods, July 2005;105 – 118.
  11. Tong T.H., Lund, D.B. Microwave Heating of Baked Dough Products with Simultaneous Heat and Moisture Transfer. Journal of Food Engineering 19 1993; 319 – 339 – 286.
  12. Bandita B. B, Sandeep J. Role of Food Microwave Drying in Hybrid Drying Technology. A Comprehensive Review of the Versatile Dehydration Processes, 2022; 1 – 11.
  13. Bhargav K., Navnitkumar K. D. Drying of Food Materials by Microwave Energy. International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences 9 (5): May 2020;1950 – 1973.
  14. Pere C., Rodier E. Microwave vacuum drying of porous media: Experimental study and qualitative considerations of internal transfers. Chemical Engineering and Processing 41 (5), May 2002; 427 – 436.
  15. Lykov A.V. Theory of drying. – М.: Energiya 1968; 471. (In Russ)
  16. Rudobashta S. P. Mathematical modeling of the drying process of dispersed materials [Text] / S. P. Rudobashta. *Proceedings of the Academy of Sciences. Energy.* 2000; 4: 98 – 109. (In Russ)
  17. Tkach V. V. Statement of the problem of modeling the process of vacuum microwave drying for determining temperature fields in foamed suspensions [Text] / V. V. Tkach, G. O. Magomedov, A. A. Shevtsov. *Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences* 2023; 50(2):153-159. (In Russ)
  18. Shipachev V.S. Higher mathematics: Studies for nemat. spec. universities. Ed. akad. A.N. Tikhonov. 2nd ed., ster. M.: Higher School, 1990; 479l. (In Russ)
  19. Tikhonov A.N., Vasilyeva A.B., Sveshnikov A.G. Differential equations: Textbook for universities. 5th ed., – М.: FIZMATLIT, 2005. (In Russ)
  20. Kholodova S.E., Peregudin S.I. Special functions in problems of mathematical physics. – St. Petersburg: NIU ITMO, 2012; 72. (In Russ)

#### **Сведения об авторах:**

Ткач Владимир Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры общепрофессиональных дисциплин; tkachbalian@yandex.ru

Магомедов Газибег Омарович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технологии хлебопекарного, кондитерского, макаронного и зерноперерабатывающего производств»; gazibeck.magomedov@yandex.ru

Шевцов Александр Анатольевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры общепрофессиональных дисциплин; shevalol@rambler.ru

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

Vladimir V. Tkach, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Department of general professional disciplines; tkachbalian@yandex.ru  
Gazibeg O. Magomedov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head. Department of Technologies of bakery, confectionery, pasta and grain processing industries; gazibeck.magomedov@yandex.ru

Alexander A. Shevtsov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Prof, Department of general professional disciplines; shevalol@rambler.ru

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

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

**Поступила в редакцию/ Received 25.09.2023.**

**Одобрена после рецензирования / Revised 17.10.2023.**

**Принята в печать /Accepted for publication 17.10.2023.**

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ**  
**INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS**

УДК 303.732.4



DOI: 10.21822/2073-6185-2023-50-4-139-147

Оригинальная статья /Original article

**Методы и алгоритмы интеллектуальной поддержки при принятии управленческих решений в реализации задач охранно-тревожной сигнализации на объектах**

**особой важности**

**О.В. Толстых<sup>1</sup>, О.В. Исаев<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Воронежский институт МВД России,  
1394065, г. Воронеж, пр. Патриотов, 53, Россия

<sup>2</sup>Воронежский институт ФСИН России,  
2394072, г. Воронеж, ул. Иркутская 1А, Россия

**Резюме. Цель.** В настоящее время существует проблема разработки недорогих и функциональных контроллеров СОТС с поддержкой алгоритмов управления совокупностью элементов систем жизнеобеспечения и подсистем ИСБ ООВ, к примеру, систем контроля и управления доступом (СКУД), а также возможностью интеграции предложенных решений СОТС в уже существующие на объектах ИСБ. В данной статье предлагается схемотехнический и программный подходы к организации перспективных СОТС, реализованных на основе программируемых микроконтроллеров. **Метод.** Для достижения поставленной цели применен системный подход, а получение количественной оценки вероятностных характеристик обнаружения нарушителя основывается на использовании методов математического моделирования. **Результат.** Разработан завершённый схемотехнический проект контроллера СОТС специального назначения, способного решать узкоспециализированные задачи на ООВ, а также характеризующегося очевидной сбалансированностью функциональных характеристик и стоимостных показателей. **Вывод.** Разработанная СОТС на основе универсальных микроконтроллеров позволяет обеспечить простоту реализации комплексов безопасности и при необходимости изменять состав используемых модулей для трансформации целевого назначения прибора ОТС в условиях сохранения параметрических показателей качества информационной системы, способствует оптимизации процессов управления и автоматизации на ООВ в условиях минимизации затрат.

**Ключевые слова:** алгоритм, управление, информационная система, информационный процесс, программируемый микроконтроллер, система охранно-тревожной сигнализации

**Для цитирования:** О.В. Толстых, О.В. Исаев. Методы и алгоритмы интеллектуальной поддержки при принятии управленческих решений в реализации задач охранно-тревожной сигнализации на объектах особой важности. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023; 50(4):139-147. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-4-139-147

**Methods and algorithms of intellectual support in making managerial decisions in the implementation of security alarm tasks at objects of special importance**

**O.V. Tolstykh, O.V. Isaev**

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

Voronezh Institute of the Federal Penitentiary Service of Russia  
1A Irkutskaya Str., Voronezh 394072, Russia

**Abstract. Objective.** Currently, there is a problem of developing low-cost and functional SOTC controllers with support for algorithms for controlling the totality of elements of life support

systems and subsystems of HMB OOV, for example, access control and management systems (ACS), as well as the possibility of integrating the proposed SOTC solutions into existing HMB facilities. This article proposes circuit engineering and software approaches to the organization of promising STS implemented on the basis of programmable microcontrollers. **Method.** To achieve this goal, a systematic approach has been applied, and obtaining a quantitative assessment of the probabilistic characteristics of detecting an intruder is based on the use of mathematical modeling methods. **Result.** A completed circuit design for a special-purpose COTS controller has been developed, capable of solving highly specialized tasks in OOV, and also characterized by an obvious balance of functional characteristics and cost indicators. **Conclusion.** The developed SOTS based on universal microcontrollers makes it possible to ensure ease of implementation of security complexes and, if necessary, change the composition of the modules used to transform the intended purpose of the OTS device while maintaining the parametric indicators of the quality of the information system, helps to optimize control and automation processes at OOV in conditions of minimizing costs.

**Keywords:** algorithm, control, information system, information process, programmable microcontroller, security alarm system.

**For citation:** O.V. Tolstykh, O.V. Isaev. Methods and algorithms of intellectual support in making managerial decisions in the implementation of security alarm tasks at objects of special importance. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2023; 50(4): 139-147. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-4-139-147

**Введение.** В рамках планирования оптимальных методов и алгоритмов интеллектуальной поддержки при принятии управленческих решений в реализации задач охранно-тревожной сигнализации на объектах особой важности проведен анализ существующей научной и научно-популярной литературы по данной тематике, а именно изучены работы Белова А.В., Магды Ю.С., Перловой О.Н., Прокопенко В.С., Ревича Ю.В. В этой связи, важно отметить, что проектирование и разработка современной многофункциональной СОТС, отвечающей современным требованиям в области инженерно-технического обеспечения ООВ невозможно без алгоритмизации задачи.

Актуальность исследования заключается в разработке альтернативных схемотехнических и программных подходов к организации перспективных СОТС, реализованных на основе программируемых микроконтроллеров Arduino.

**Постановка задачи.** С учетом вышеизложенного, целью работы является проектирование современного многофункционального контроллера ОТС, отвечающего требованиям совокупности стандартов в области инженерно-технического обеспечения деятельности ООВ. Для достижения поставленной цели необходимо обеспечить решение следующих задач:

- анализ общих принципов построения и функционирования СОТС с обобщением основных перспектив их развития;
- исследование совокупности СОТС, применяемых для решения узкоспециализированных задач на ООВ, с обзором альтернативных подходов к их организации на основе универсальных программируемых микроконтроллеров;
- исследование концептуальных подходов к проектированию СОТС;
- разработка схемотехнической модели контроллера ОТС на основе универсальных программируемых микроконтроллеров Arduino;
- разработка программно-управляющего кода (скетча) для контроллера ОТС, реализованного на основе универсальных программируемых микроконтроллеров Arduino;
- тестирование адекватности логики работы, спроектированной микроконтроллерного контроллера ОТС.

Новизна схемотехнического проекта контроллера СОТС ООВ заключается в его универсальности для любых объектов охраны, гибкости модернизации, а также высоких показателях надежности.

**Методы исследования.** Алгоритм проектирования многофункциональной СОТС.

Проектируемая СОТС должна состоять из следующих ключевых элементов, каждый из которых обеспечивает решение определённой задачи и общую работоспособность будущего комплекса (рис.1): пульт управления контроллером СОТС; контроллер СОТС; элементы питания; охранно-тревожные извещатели; каналобразующая аппаратура.



**Рис. 1. Основные элементы проектируемой СОТС**

**Fig. 1. Main elements of the projected SOTS**

1. Пульт управления предназначен для обеспечения информационного процесса управления контроллером СОТС, а точнее состояниями шлейфов сигнализации (ШС) и исполнительных устройств. Он позволяет пользователю нажатием одной клавиши произвести постановку (снятие) на охрану всех охранно-тревожных извещателей, открытие электромеханических замков точек доступа.

Конструктивно пульт управления будет объединять в себе следующие модули: модуль пассивного зуммера с усилителем (предназначен для сопровождения звуковыми сигналами этапов работы исполнительных устройств и изменения состояний ШС СОТС); модуль клавиатуры (предназначен для подачи команд контроллеру СОТС посредством ввода определенных символов); LCD-дисплей (предназначен для отображения вводимой на клавиатуре контроллера СОТС информации и формирования служебных текстовых сообщений); адаптер I2C для LCD-модулей (оптимизирует количество используемых линий связи между LCD-дисплеем и контроллером СОТС и, как следствие, уменьшает информационную нагрузку на входы контроллера); светодиоды (обеспечивают индикацию

состояний ШС СОТС). Пульт управления объединяет модули, обеспечивающие пользователю взаимодействие с контроллером СОТС и позволяет осуществлять прием и обработку информации о состоянии ШС СОТС.

2. Контроллер СОТС, как схемотехническая реализация должен включать в себя следующие модули: плата микроконтроллера СОТС; релейные модули на n-каналов (позволяют изменять состояния исполнительных устройств за счет подачи на них управляющих сигналов).

3. Элементы питания: блок питания AC-DC 220-12 вольт (обеспечивает питание платы микроконтроллера); блок питания AC-DC 220-5 вольт (обеспечивает питание GSM (Global System for Mobile Communications)- модуля); аккумулятор 12 вольт (обеспечивает питание платы микроконтроллера при отключении основного электропитания); релейный модуль переключения питания (коммутирует цепь электропитания с основной на резервную).

4. Охранно-тревожные извещатели ООВ различного принципа действия предназначены для регистрации фактов нарушения границ охраняемых зон (помещений).

5. GSM-модуль, осуществляющий формирование тревожных смс-сообщений или автоматизированных звонков на предварительно запрограммированный номер телефона персонала охраны.

Обобщенная структурная схема СОТС на базе микроконтроллеров изображена на рис. 2.



Рис. 2. Обобщенная структурная схема СОТС  
Fig. 2. Generalized block diagram of the SOTS

Проектирование контроллера СОТС произведем на основе универсального программируемого микроконтроллера Arduino серий «Uno», либо «Mega» [7].

Детализированная проектно-монтажная схема СОТС на базе микроконтроллера Arduino серии «Uno» изображена на рисунке 3 [2].

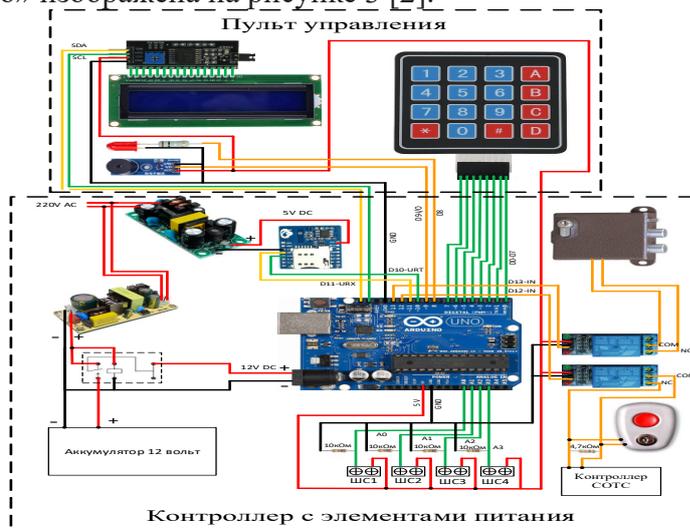


Рис. 3. Проектно-монтажная схема СОТС  
Fig. 3. Design and installation diagram of the SOTS

Рассмотрим альтернативный вариант реализации подключений ШС. В реализованном проекте напряжение, подаваемое в ШС, составляет 5 вольт. Это связано со спецификой используемого контроллера СОТС. Однако, есть возможность подавать в ШС напряжение 12

вольт, но данное решение сложнее в схемотехническом плане, так как необходимо использовать дополнительные резисторы в качестве делителей напряжения, а также конденсатор для фильтрации помех. Но несмотря на определенную сложность, данное решение позволяет понизить нагрузку на контроллер, за счет сокращения числа подключенных устройств. К тому же, не всегда есть возможность подавать напряжение в ШС непосредственно от контроллера. При этом, сигнал с амплитудой большего напряжения не так сильно будет затухать с увеличением расстояния. Использование данного варианта подключения не требует дополнительного источника напряжения, так как можно осуществлять подачу питания на охранно-тревожные извещатели и в электрический контур ШС от общего блока питания. Схема подключения ШС с указанием номинала сопротивлений резисторов и конденсаторов изображена на рис. 4.

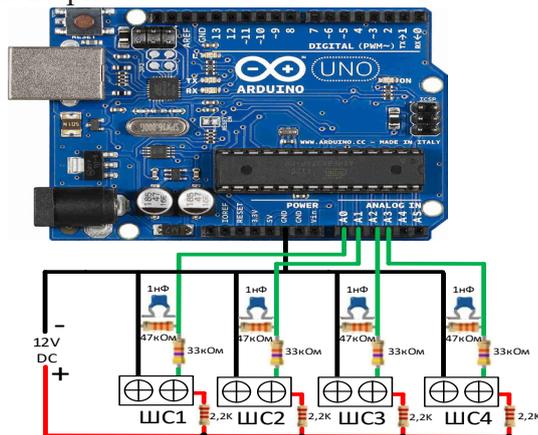


Рис. 4. Альтернативный вариант подключения ШС

Fig. 4. Alternative SHS connection option

Напряжение 12 вольт через токоограничивающий резистор сопротивлением 2,2 кОм подаётся в охранный шлейф. Резисторы сопротивлением 33 кОм и 47 кОм образуют делитель напряжения, который согласовывает 12-вольтный уровень шлейфа с максимальным входным напряжением аналогового входа Arduino Uno, равным 5 вольтам. Конденсатор в совокупности с остальными компонентами выполняет задачу фильтрации помех.

Учитывая все вышеперечисленные факторы и то, что сопротивление добавочного резистора, используемого в ШС, предполагалось номиналом в 2 кОм, получаем около 2,5 вольт на аналоговом входе Arduino при 12-вольтном питании шлейфа. Это как раз граница диапазона встроенного в микроконтроллер АЦП, что позволит удобно отслеживать любые отклонения параметров ШС как в большую, так и в меньшую сторону. Диапазон от 2 до 3 вольт будем считать допустимым и представлять в виде цифрового фильтра помех. Все уровни сигналов, отличающиеся от границ допустимого диапазона, будут считаться сигналом тревоги (рис. 5).



Рис. 5. Граничные диапазоны состояний ШС

Fig. 5. Boundary ranges of SHS states

После физического подключения всех элементов схемы, необходимо написать уникальный, управляющий программный код (скетч) на языке программирования и загрузить его во внутреннюю память микроконтроллера (рис. 6).

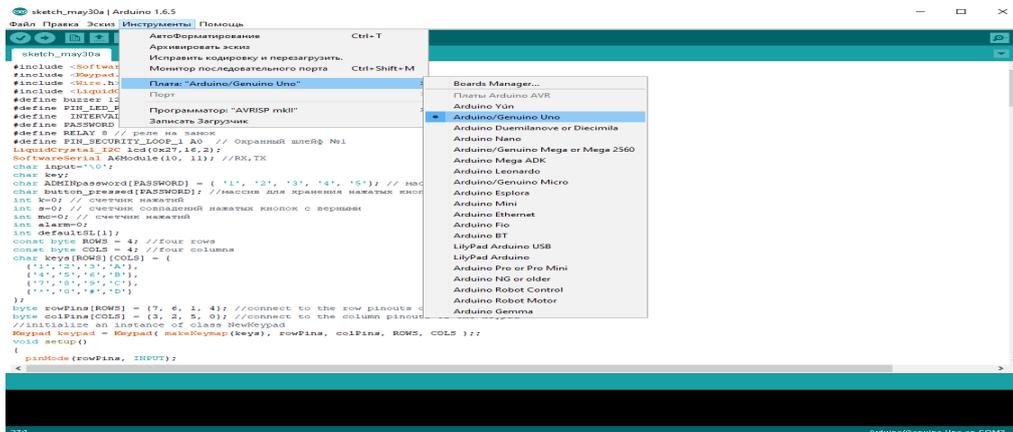


Рис. 6. Компиляция программного кода  
Fig. 6. Program code compilation

Схемотехническая реализация контроллера ОТС требует проведения опытной эксплуатации прибора с подключенными к нему охранными извещателями, а также количественной оценки вероятностных характеристик обнаружения нарушителя, что необходимо для подтверждения адекватности его работы.

**Обсуждение результатов.** Оценка вероятностных характеристик обнаружения нарушителя осуществлена на основе разработанного алгоритма проведения опытной эксплуатации прибора и соответствующей ему математической модели, представленной выражениями (1) и (2). Перед началом опытной эксплуатации (проверки) составим план, определяющий число контрольных пересечений  $n_k$  зоны обнаружений (ЗО) ООВ каждым из способов для заданного допустимого числа пропусков формирования извещения о проникновении  $m$ . План проверки оформим в виде табл. 1.

Таблица 1. План опытной эксплуатации при проверке вероятности обнаружения извещателем нарушителя

Допустимое число пропусков формирования извещения о проникновении нарушителя, $m$ Allowable number of omissions in generating a notification about intruder penetration	0	1	2	3	...	$m_{\max}$
Число контрольных пересечений ЗО, $n_k$ Number of control crossings of the area						$n_{k \max}$

Число контрольных пересечений ЗО определим по формуле 1, задавая допустимое число пропусков формирования извещения о проникновении  $m$  из ряда 0, 1, 2, 3 и т.д.

$$n_k = \left\lceil \frac{1}{2(1 - P_{\text{обн.ЭД}})} - 0,25 \right\rceil X_{\beta}^2(2m + 2) + 0,5(m - 1), \quad (1)$$

где  $P_{\text{обн.ЭД}}$  – вероятность обнаружения нарушителя, заданная в эксплуатационной документации (ЭД) на извещатель;  $X_{\beta}^2(2m + 2)$  – квантиль распределения при уровне значимости  $\beta$  ( $\beta$  – риск заказчика) и числе степеней свободы  $f = 2m + 2$ .

Значения риска заказчика  $\beta$  и вероятности обнаружения нарушителя  $P_{\text{обн.ЭД}}$  должны быть заданы в ЭД на извещатель. При отсутствии в ЭД значений  $\beta$  и  $P_{\text{обн.ЭД}}$ , их значения устанавливает рабочая группа:

- значение  $\beta$  выбирается из ряда: 0,10; 0,20; 0,30; 0,40;
- значение  $P_{\text{обн.ЭД}}$  выбирается из ряда: 0,90; 0,95; 0,98.

Значение  $n_k$  округлим в сторону увеличения до ближайшего целого числа.

Число контрольных пересечений ЗО  $n_k$  (при  $m \geq 3$ ) устанавливает рабочая группа, исходя из реальных возможностей проведения испытаний. Произведем минимальное число контрольных пересечения ЗО в направлении перпендикулярном осевой линии, в соответствии с планом испытаний. При этом: пересечения производят равномерно по всей длине ЗО; пересечения производят с  $V_{min}$ ,  $V_{max}$  и средней  $V_{cp}$  скоростью.

Средняя скорость  $V_{cp}$  определяется по формуле:

$$V_{cp} = (V_{max} + V_{min})/2, \quad (2)$$

где  $V_{min}$  и  $V_{max}$  - минимальная и максимальная скорости пересечения ЗО, заданные в ЭД на извещатель.

– пересечение произведем поочередно в обе стороны при равномерном распределении  $V_{min}$ ,  $V_{max}$ ,  $V_{cp}$  по числу пересечений ЗО и направлениям;

– зафиксируем и исследуем все пропуски извещений о тревоге с целью выявления их причин;

– каждое последующее пересечение ЗО повторим не ранее чем через 10 секунд после выдачи сигнала «Тревога».

Результаты, полученные в ходе контрольных пересечений ЗО каждым из способов, оформим в виде табл. 2.

**Таблица 2. Результаты проверки вероятности обнаружения нарушителя извещателем**

**Table 2. Results of checking the probability of detection of the intruder by the detector**

Скорость пересечения ЗО Speed AZ intersections	Интервалы зоны обнаружения, м Detection zone intervals, m						Суммарное число Total number		
	0 – X		X – 2X		2X – 3X		и т. д.	пересечений ЗО, $n_s$ intersections	пропусков формирования извещения о проникновении, $m_s$ omissions of notification generation penetration
$V_{min}$	$n_i$	$m_i$	$n_i$	$m_i$	$n_i$	$m_i$			
$V_{cp}$	$n_i$	$m_i$	$n_i$	$m_i$	$n_i$	$m_i$			
$V_{max}$	$n_i$	$m_i$	$n_i$	$m_i$	$n_i$	$m_i$			

$n_i$  - число пересечений конкретного интервала зоны обнаружения; number of intersections of a specific detection zone interval.  
 $m_i$  - число пропусков формирования извещения о проникновении при пересечениях конкретного интервала зоны обнаружения; number of missed intrusion notifications when crossing a specific interval of the detection zone

Сравним полученное суммарное значение числа пропусков формирования извещения о проникновении  $m_s$  при пересечении ЗО с заданным в плане испытаний значением  $m$ , при этом: – если выполняется условие  $m_s \leq m$ , верхняя доверительная граница вероятности обнаружения  $P_{обн.} \geq P_{обн.ЭД}$  – испытания прекращают.

При необходимости определим значение верхней доверительной границы вероятности обнаружения по формуле:

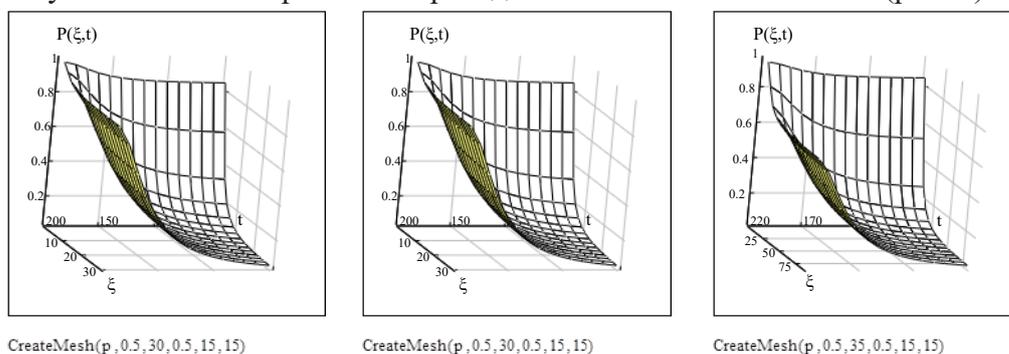
$$P_{i\ddot{a}i} = 1 - \frac{X_{\beta}^2(2m_s + 2)}{2n_s - m_s + 1 + 0,5X_{\beta}^2(2m_s + 2)}, \quad (3)$$

– если выполняется условие  $m_s > m$ , продолжаем контрольные пересечения ЗО в соответствии с планом испытаний.

Если в ходе испытаний число контрольных пересечений ЗО  $n_k$  превысит значение  $n_{k, max}$ , испытания прекращают. Определим нижнюю доверительную границу вероятности обнаружения  $P_{обн.}$  по формуле 3 для конкретного способа пересечения ЗО, при этом за

суммарное число контрольных пересечений  $n_s$  примем общее число пересечений, сделанных в процессе испытаний конкретным способом, а за суммарное значение пропусков формирования извещения о проникновении  $m_s$  - соответствующее  $n_s$  число пропусков формирования извещения о проникновении.

Контроллер ОТС с подключенным к нему охранным извещателем считают выдержавшим испытание, если значение верхней доверительной границы вероятностей обнаружения  $P_{обн.}$ , полученное в ходе проведения испытаний не меньше значения указанного в ЭД, либо указанного экспертами по проведению опытного испытания (рис. 7).



**Рис. 7. Оценка вероятностных характеристик обнаружения нарушителя**  
**Fig. 7. Estimation of probabilistic characteristics of intruder detection**

Предложенная математическая модель количественной оценки вероятностных характеристик обнаружения нарушителя адекватна решаемой в исследовании задаче и подтверждает корректность функционирования разработанного схмотехнического решения на примере контроллера ОТС.

**Вывод.** Разработанное устройство имеет очевидную практическую значимость и позволяет решать задачи широкого спектра. Данная программно-аппаратная реализация позволяет в случае необходимости расширять и совершенствовать любого рода устройства специального назначения с минимальными экономическими затратами.

Разработанная СОТС на основе универсальных микроконтроллеров позволяет обеспечить простоту реализации комплексов безопасности и при необходимости изменять состав используемых модулей для трансформации целевого назначения прибора ОТС в условиях сохранения параметрических показателей качества информационной системы [4-6]. Таким образом, разработка проектного решения контроллера СОТС специального назначения способствует оптимизации процессов управления и автоматизации на ООВ в условиях минимизации затрат [3].

#### Библиографический список:

1. Особенности организации систем контроля и управления доступом на сложном объекте / О.В. Толстых, О.В. Багринцева, О.С. Иванченко//Охрана, безопасность, связь. Т.1.№ 4. – 2019.- с. 122-125.
2. Исаев О.В. Разработка проблемно-ориентированных систем управления, принятия решений и оптимизации технических объектов УИС на примере универсальных микроконтроллерных систем [Текст] / О.В. Исаев, С.Ю. Кобзистый, Е.В. Дмитриев // Актуальные проблемы деятельности подразделений УИС: сб. тр. все-рос. науч.-практ. конф. – Воронеж, 2020. – С. 11-17.
3. Исаев О.В. КСБО «СИНЕРГЕТ КСБО»: настройка и конфигурирование базовых подсистем: учебно-методическое пособие / О. В. Исаев, А. В. Паринов, Д. Г. Зыбин, С. Ю. Кобзистый, О. В. Морозов, О. А. Андреева; ФКОУ ВО Воронежский институт ФСИН России. – Воронеж: Издательско-полиграфический центр «Научная книга» 2018. - 136 с.
4. Исаев О.В. Модели и алгоритмы оценки устойчивости функционирования информационной системы в условиях воздействия негативных факторов/ В.С. Стародубцев, О.В. Исаев // Вестник Воронежского института ФСИН России. 2018. – № 1. – С. 104–107.
5. Isaev O.V. Estimation of the boundaries of the region of stable functioning of elements of special-purpose information systems characteristic/O.V. Isaev, V.S. Starodubtsev, A.S. Dubrovin, A.S. Kravchenko // Journal of Physics: Conference Series. 2019. C. 12017.
6. Isaev O.V. Method for modeling accuracy measuring in evaluation of sustainability of information structure

- security system in terms of negative impacts / O.V. Isaev, A.S. Kravchenko, V.P. Irkhin // Proceedings - 2017 2nd International Ural Conference on Measurements, UralCon 2017. 2017. С. 205-210.
7. Белов А.В. Программирование микроконтроллеров для начинающих и не только / А.В. Белов. - СПб.: Наука и техника, 2016. - 352 с.
  8. Магда Ю.С. Программирование и отладка C/C++ приложений для микроконтроллеров ARM / Ю.С. Магда. - М.: ДМК, 2014. - 168 с.
  9. Перлова О.Н. Проектирование и разработка информационных систем: Учебник / О.Н. Перлова. - М.: Академия, 2018. - 272 с.
  10. Прокопенко В.С. Программирование микроконтроллеров ATMEL на языке C / В.С. Прокопенко. - СПб.: Корона-Век, 2015. - 320 с.
  11. Ревич Ю.В. Практическое программирование микроконтроллеров Atmel AVR на языке ассемблера / Ю.В. Ревич. - СПб.: BHV, 2012. - 352 с.

#### References

1. Tolstykh O. V. Features of the organization of access control and management systems on a complex object. O.V. Tolstykh, O.V. Bagrintseva, O.S. Ivanchenko. *Security, security, communication*. 2019; 1(4): 122-125. (In Russ).
2. Isaev O. V. Development of problem-oriented control systems, decision-making and optimization of technical objects of UIS on the example of universal microcontroller systems [Text] / O. V. Isaev, S. Yu. Kobzisty, E. V. Dmitriev. Actual problems of activity of UIS divisions: sat. tr. vs-ros. nauch. - prakt. konf. - Voronezh, 2020; 11-17. (In Russ).
3. Isaev O. V. KSBO «SYNERGET KSBO»: setting up and configuring basic subsystems: an educational and methodological manual. O. V. Isaev, A.V. Parinov, D. G. Zybin, S. Yu. Kobzisty, O. V. Morozov, O. A Andreeva. - Voronezh: Publishing and printing center «Scientific Book» - 2018; 136. (In Russ).
4. Isaev O. V. Models and algorithms for assessing the stability of the information system functioning under the influence of negative factors. V. S. Starodubtsev, O. V. Isaev. *Bulletin of the Voronezh Institute of the Federal Penitentiary Service of Russia*. 2018; 1: 104-107. (In Russ).
5. Isaev O.V. Estimation of the boundaries of the region of stable functioning of elements of special-purpose information systems characteristic/O.V. Isaev, V.S. Starodubtsev, A.S. Dubrovin, A.S. Kravchenko // Journal of Physics: Conference Series. 2019;12017.
6. Isaev O.V. Method for modeling accuracy measuring in evaluation of sustainability of information structure security system in terms of negative impacts. O.V. Isaev, A.S. Kravchenko, V.P. Irkhin. *Proceedings - 2017 2nd International Ural Conference on Measurements, UralCon 2017*; 205-210.
7. Belov A.V. Programming microcontrollers for beginners and not only. A.V. Belov. - SPb. : *Science and technology*, 2016; 352. (In Russ).
8. Magda Yu.S. Programming and debugging of C/C ++ applications for ARM microcontrollers. Yu.S. Magda. М. : ДМК, 2014; 168. (In Russ).
9. Perlova O.N. Design and development of information systems: Textbook. ON. Perlov. М. : Academy, 2018; 272 p. (In Russ).
10. Prokopenko V.S. Programming of ATMEL microcontrollers in C. V.S. Prokopenko. SPb. : Korona-Vek, 2015; 320. (In Russ).
11. Revich Yu.V. Practical programming of Atmel AVR microcontrollers in assembly language / Yu.V. Revich. SPb.: BHV, 2012; 352. (In Russ).

#### Сведения об авторах:

Толстых Ольга Владимировна, кандидат технических наук, доцент кафедры радиотехнических систем и комплексов охранного мониторинга; tov48@mail.ru

Исаев Олег Викторович, кандидат технических наук, доцент, старший преподаватель кафедры технических комплексов охраны и связи; olegisaev71@mail.ru

#### Information about authors:

Olga V. Tolstykh, Cand. Sci. (Eng), Assoc. Prof., Department of Radio Engineering Systems and Security Monitoring Complexes; tov48@mail.ru

Oleg V. Isaev, Cand. Sci. (Eng), Assoc. Prof., Senior Teacher, Department of technical complexes of safety and communication; olegisaev71@mail.ru

#### Конфликт интересов / Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/ Received 05.10.2023.

Одобрена после рецензирования / Reviced 27.10.2023.

Принята в печать /Accepted for publication 27.10.2023.

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ**  
**INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS**

УДК 004.627:504.064.36:519.688



DOI: 10.21822/2073-6185-2023-50-4-148-157 Оригинальная статья / Original article

**Организация реагирования на инциденты информационной безопасности**

**Д.О. Трофимов<sup>1</sup>, М.С. Шепелев<sup>1</sup>, С.А. Резниченко<sup>1,2,3</sup>**

<sup>1</sup>Финансовый университет при правительстве Российской Федерации,  
<sup>1</sup>25993, г.Москва, Ленинградский пр–кт, 49, Россия,

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,  
<sup>2</sup>115409, г.Москва, Каширское шоссе, 31, Россия,

<sup>3</sup> Российский государственный гуманитарный университет,  
<sup>3</sup>125047, г. Москва, Миусская площадь, д. 6, Россия

**Резюме. Цель.** Разработка практических рекомендаций для создания эффективной системы реагирования на инциденты информационной безопасности (ИБ). **Метод.** Исследование основано на существующих методах и инструментах обнаружения и анализа инцидентов ИБ, а также последствий таких инцидентов и их влияния на работу компании или организации. **Результат.** Разработан комплекс практических рекомендаций, направленных на создание эффективной системы реагирования на инциденты информационной безопасности (ИБ). Выявлены наиболее эффективные и адаптированные подходы, включающие как технические средства обнаружения, так и процессы оперативного реагирования на инциденты. Рекомендации созданы с учетом особенностей компаний и организаций различных отраслей, а также предполагаются для использования лицами, не обладающими глубокими знаниями в области информационной безопасности. Рекомендации включают понятные пошаговые инструкции, ресурсы и советы, которые позволят компаниям легко внедрять предложенные меры в своей практике. **Вывод.** Разработка эффективной системы реагирования на инциденты ИБ является критически важной для компаний и организаций, так как они сталкиваются с растущим числом кибератак и угроз информационной безопасности. Создание эффективной системы реагирования на инциденты ИБ является неотъемлемой частью успешной бизнес-стратегии. Разработанные практические рекомендации обладают потенциалом существенно уменьшить риски и ущерб, связанные с ИБ, даже для компаний и организаций без предварительного опыта в данной области. Рекомендации сосредотачиваются не только на технических аспектах, но и на организационных мероприятиях, чтобы обеспечить своевременное обнаружение, анализ и реагирование на инциденты.

**Ключевые слова:** информационная безопасность, инцидент, обнаружение, реагирование, анализ, угроза

**Для цитирования:** Д.О. Трофимов, М.С. Шепелев, С. А. Резниченко. Организация реагирования на инциденты информационной безопасности. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023; 50(4):148-157. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-4-148-157

**Organization of response to information security incidents**

**D.O. Trofimov<sup>1</sup>, M.S. Shepelev<sup>1</sup>, S.A. Reznichenko<sup>1,2,3</sup>**

<sup>1</sup>Financial University under the government of Russian Federation,  
<sup>1</sup>49 Leningradsky Ave., Moscow 125993, Russia,

<sup>2</sup>National Research Nuclear University “MEPhI”, (Moscow Engineering Physics Institute),  
<sup>2</sup> 31 Kashirskoe highway, Moscow 115409, Russia,

<sup>3</sup>Russian State University for the Humanities,  
<sup>3</sup>6 Miusskaya Square, Moscow 125047, Russia

**Abstract. Objective.** Development of practical recommendations for creating an effective information security incident response system. **Method.** The article includes an analysis of existing methods and tools for detecting and analyzing information security incidents, as well as a study of the consequences of such incidents and their impact on the work of a company or organization. **Result.** Development of a set of practical recommendations aimed at creating an effective information security incident response system. During the analysis of existing methods and tools for the detection and analysis of information security incidents, the most effective and adapted approaches were identified. These methods include both technical means of detection and rapid incident response processes. The recommendations were created taking into account the characteristics of companies and organizations of various industries and are also intended for use by persons who do not have deep knowledge in the field of information security. The recommendations include clear step-by-step instructions, resources and tips that will allow companies to easily implement the proposed measures in their practice. **Conclusion.** The development of an effective information security incident response system is critically important for companies and organizations, as they face an increasing number of cyber-attacks and threats to information security. Creating an effective information security incident response system is an integral part of a successful business strategy. The developed practical recommendations have the potential to significantly reduce the risks and damage associated with information security, even for companies and organizations without prior experience in this field. These recommendations focus not only on technical aspects, but also on organizational measures to ensure timely detection, analysis and response to incidents.

**Keywords:** Information security, reaction, analyse, threat, detection, incident

**For citation:** D.O. Trofimov, M.S. Shepelev, S.A. Reznichenko. Organization of response to information security incidents. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2023; 50(4): 148-157. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-4-148-157

**Введение.** В современном информационном обществе безопасность информации играет важную роль. Каждый день компании и организации сталкиваются с угрозами информационной безопасности, такими как вирусы, хакерские атаки, утечки данных и другие инциденты, которые могут привести к непредсказуемым последствиям.

Для борьбы с такими угрозами важно иметь готовность к реагированию на инциденты информационной безопасности. Согласно ГОСТ Р ИСО/МЭК ТО 18044-2007 [1]: инцидент информационной безопасности — появление одного или нескольких нежелательных или неожиданных событий ИБ, с которыми связана значительная вероятность компрометации бизнес-операций и создания угрозы ИБ. Также Российская компания Kaspersky даёт определение реагирования на инциденты информационной безопасности — в мире информационной безопасности так называют комплекс мероприятий по обнаружению и прекращению кибератаки или утечки данных из инфраструктуры организации и устранению последствий [2].

Организация реагирования на инциденты информационной безопасности является важной частью общей стратегии информационной безопасности компании или организации. Однако, несмотря на внедрение типовых политик информационной безопасности и применение защитных мер, невозможно обеспечить абсолютную защиту информации, информационных систем, сервисов и сетей.

Всегда существует вероятность наличия уязвимостей, которые могут сделать защиту информационной безопасности неэффективной, и, следовательно, возможность возникновения инцидентов информационной безопасности. Такие инциденты могут оказывать негативное воздействие на бизнес-процессы организации как прямым, так и косвенным образом. Более того, всегда будут появляться новые, ранее неизвестные угрозы. Если конкретная организация не готова должным образом реагировать на такие инциденты,

это может привести к неэффективной реакции и усилить отрицательное влияние на бизнес.

**Постановка задачи.** В данной работе рассматриваются основные принципы и подходы к организации реагирования на инциденты ИБ, анализируются существующие методы и инструменты для обнаружения и анализа инцидентов ИБ, исследуются последствия инцидентов ИБ и их влияние на работу компании/организации, а также на основе вышесказанного разрабатываются рекомендации по созданию эффективной системы обнаружения и реагирования на инциденты ИБ.

**Методы исследования.** Для любой организации, которая ответственно относится к информационной безопасности, важно использовать структурный и плановый подход к:

1. Обнаружению, оповещению и оценке инцидентов информационной безопасности: необходимо иметь механизмы и процессы для обнаружения и оперативного оповещения о возникновении инцидентов. Кроме того, проводится оценка и анализ инцидентов для понимания их характеристик и последствий.
2. Реагированию на инциденты информационной безопасности: в случае возникновения инцидентов применяются соответствующие защитные меры с целью предотвращения или уменьшения негативных последствий. Важно также планировать и проводить меры по восстановлению после инцидентов, а также обеспечивать непрерывность бизнес-процессов.
3. Извлечению уроков из инцидентов информационной безопасности: на основе опыта и анализа инцидентов принимаются меры по внедрению превентивных защитных мер, чтобы предотвратить подобные инциденты в будущем. Также важно улучшать общий подход к управлению инцидентами информационной безопасности, опираясь на полученные знания и опыт.

Для достижения вышесказанных целей менеджмент инцидентов ИБ подразделяют на четыре отдельных этапа, аналогично циклу PDCA (Plan, Do, Check, Act), методологии принятия решения, используемой в управлении качеством. Также известен как цикл Деминга: планирование и подготовка; использование; анализ; улучшение. Рассмотрим каждый этап:

**Планирование и подготовка:** на данном этапе следует создать или обновить существующие политики ИБ, связанные с реагированием на инциденты. Также следует создать в организации соответствующее структурное подразделение с заданными обязанностями и ответственностью или же нанять компанию уже с готовым решением по данному вопросу, например SOC (SOC (Security operations center) - структурное подразделение организации, отвечающее за оперативный мониторинг IT-среды и предотвращение киберинцидентов.

Также Компания Kaspersky даёт следующее определение данному этапу - разработка плана реагирования на инциденты, который включает в себя сценарии работы сотрудников при наступлении того или иного ИБ-события, список необходимых ресурсов, перечень применяемых инструментов, права и обязанности команды реагирования. Также к этапу подготовки относится обучение ответственных за реагирование на инцидент сотрудников. Этот этап не привязан к конкретному инциденту [2].

**Использование:** при использовании системы менеджмента инцидентов ИБ необходимо осуществить следующие процессы:

1. Обнаружение и оповещение о возникающих событиях ИБ (посредством анализа системы человеком или использования различных систем, например SIEM (SIEM (Security Information and Event Management) - это решение, которое позволяет организациям обнаруживать, анализировать и устранять угрозы безопасности раньше, чем они нанесут ущерб бизнесу;
2. Обогащение, фильтрацию и нормализацию событий, чтобы определить, какие события можно отнести к категории инцидентов ИБ;
3. Реагирование на инцидент ИБ;
4. Необходимо предоставлять информацию о случившемся инциденте ИБ и

все соответствующие детали персоналу внутри своей организации, а также сотрудникам сторонних организаций.

5. Провести правовую экспертизу;
6. Провести запись всех действий и решений для последующего анализа.

**Анализ:** после устранения инцидента ИБ необходимо извлечь и изучить информацию из инцидента, определить улучшения, которые могут быть внедрены в меры информационной безопасности, и использовать эту информацию для улучшения системы управления инцидентами информационной безопасности в целом.

**Улучшение:** улучшения проводятся на основе данных из проведенного анализа или современных тенденций в мире. Этап «Улучшение» включает в себя пересмотр результатов анализа уже произошедших инцидентов ИБ, а также на основе анализа рисков информационной безопасности и менеджмента организации.

Также производится улучшение системы управления инцидентами информационной безопасности и ее документации. В этом процессе инициируются улучшения в области безопасности, включая внедрение новых или обновленных мер информационной безопасности. Это позволяет организации адаптироваться к изменяющимся угрозам и повысить эффективность своих мероприятий по обеспечению безопасности информации (рис 1.).

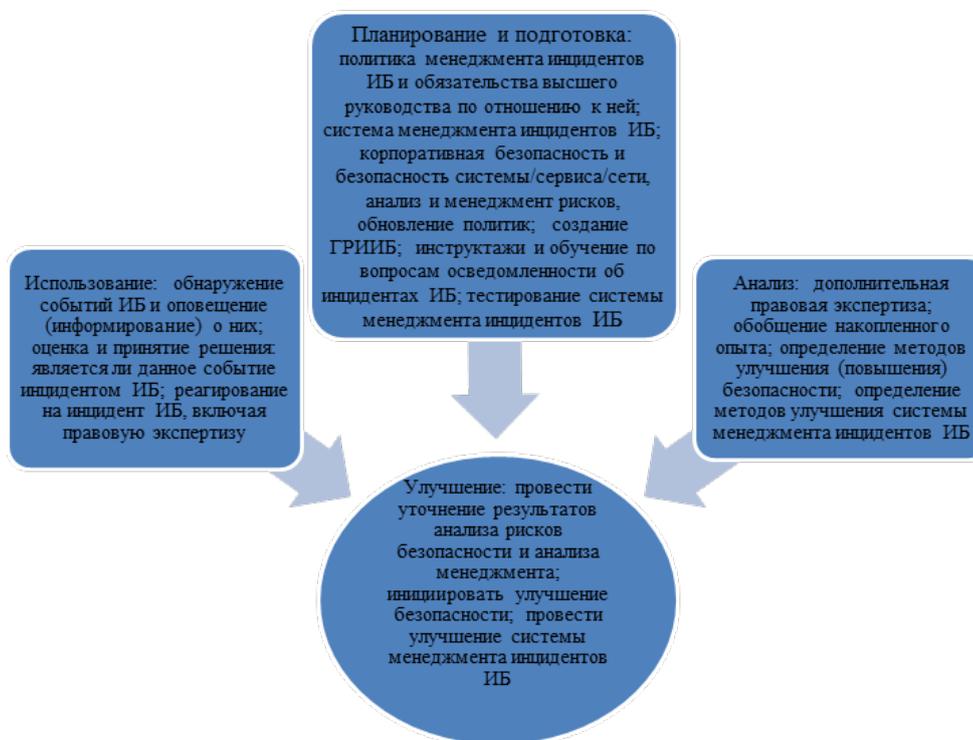


Рис. 1. Основное содержание менеджмента инцидентов информационной безопасности [2]

Fig. 1. Main contents of information security incident management [2]

Также компания Kaspersky дополняет этап «Использование» следующими пунктами:

- Идентификация. Собственно, реагирование на инцидент начинается с обнаружения кибератаки или утечки данных. На этом этапе поступает оповещение об инциденте, специалисты оценивают угрозу и собирают данные о ней. Обычно процесс идентификации сводится к изучению логов.

- Сдерживание. Команда реагирования принимает меры для пресечения распространения угрозы. К ним может относиться изоляция пораженных устройств, изоляция затронутых сегментов сети, временное отключение интернета и так далее. Одна из дополнительных целей этого этапа — не допустить уничтожения следов атаки, которые потребуются при расследовании.

- Ликвидация — устранение угрозы, удаление вредоносных файлов, смена паролей

пострадавших учетных записей, восстановление утраченных данных и так далее.

- Возвращение к работе — ввод обратно в эксплуатацию систем, затронутых инцидентом, подключение устройств к сети, тестирование и мониторинг корректности их работы [2].

В настоящее время существует множество методов и инструментов для обнаружения и анализа инцидентов ИБ. Они разделяются на автоматизированные и традиционные.

К традиционным можно отнести:

*Журналы событий:* сотрудник может анализировать журналов событий вручную. Журналы системных событий, сетевых устройств и приложений, могут помочь выявить необычную или потенциально вредоносную активность. Необходимо обращать внимание на аномалии, подозрительные попытки входа, ошибки аутентификации и другие события, которые могут указывать на инцидент ИБ.

*Мониторинг сетевого трафика:* анализируя сетевой трафик вручную, можно обнаружить аномалии, подозрительные пакеты или активность, которая отличается от обычного поведения. Это может помочь выявить потенциальные инциденты ИБ.

*Анализ логов системы:* ручной анализ логов системы, включая файлы журналов операционной системы и приложений, может помочь выявить аномалии, необычные действия или попытки несанкционированного доступа. Необходимо обращать внимание на ошибки, предупреждения или любую активность, которая не соответствует ожидаемому поведению.

*Отчёты:* обратите внимание на отчеты и сообщения от сотрудников или пользователей о подозрительной активности или необычном поведении системы.

*Взаимодействие с другими специалистами по ИБ:* сотрудничество с другими специалистами по информационной безопасности, обмен опытом и знаниями может помочь в обнаружении и анализе инцидентов ИБ.

В качестве автоматизированных систем рассмотрим SIEM, SOAR, EDR и UEBA:

1) SIEM — это система, накапливающая в себе все данные (журналы работы или, как говорят спецы, логи) от других средств защиты, умеющая понимать многие «форматы» логов из разных источников - средств защиты, быстро искать нужную информацию в этих логах, долгое время их хранить [3] SIEM-система (Security Event Management) — это объединение двух классов: SEM, который используется для мониторинга событий безопасности в реальном времени; SIM, который используется для анализа и хранения данных с различных объектов инфраструктуры организации. Основные задачи SIEM-систем:

- получение журналов с разнообразных средств защиты;
- приведение к единообразному формату (нормализация) полученных данных; классифицирование уже нормализованных сообщений в зависимости от их содержания, то есть таксономия нормализованных данных; корреляция классифицированных событий;
- создание инцидента, предоставление инструментов для проведения расследования
- хранение информации о событиях и инцидентах в течение длительного времени (от 6 месяцев);
- быстрый поиск по хранящимся в SIEM данным.

Для эффективной работы с системой управления информационной безопасностью (SIEM) специалист по ИБ должен иметь возможность быстро и удобно осуществлять поиск по предыдущим инцидентам и событиям, хранящимся в SIEM-системе.

Это позволяет специалисту получить дополнительные технические подробности для проведения расследования атаки или анализа произошедшего инцидента.

2) SOAR (Security Orchestration, Automation and Response) — класс программных продуктов, предназначенных для оркестровки систем безопасности, то есть их координации и управления ими. [4]

Решения класса SOAR позволяют собирать данные о событиях информационной безопасности из различных источников, обрабатывать их и автоматизировать типовые сценарии реагирования на них, тем самым избавляют специалистов по безопасности от необходимости управлять каждым из них в отдельности, и помогают сфокусироваться на анализе сложных инцидентов. Функциональные возможности: сбор данных о потенциальных инцидентах; анализ инцидента; идентификация и классификация угроз; реагирование на инциденты; визуализация данных и формирование отчетности.

На основе комплексного анализа полученных данных решение SOAR оценивает текущее состояние инфраструктуры и идентифицирует потенциально небезопасные события. Затем система классифицирует эти события в соответствии с их степенью риска и информирует специалистов о них. При необходимости SOAR может принимать автоматизированные меры, такие как изоляция зараженных устройств, чтобы предотвратить дальнейшее распространение атаки. Эти меры соответствуют политике безопасности компании и направлены на минимизацию угрозы для системы. После чего формирует полноценный отчет о произошедшем инциденте.

1) EDR (Endpoint Detection & Response) - передовая система безопасности, которая объединяет различные компоненты для обеспечения безопасности конечных точек (Конечные точки — это компьютеры, ноутбуки, мобильные устройства и другие устройства, подключенные к сети). В отличие от традиционных решений безопасности, основанных на анализе паттернов и сигнатур, решения EDR отслеживают приток внешнего трафика и обрабатывают операции и действия фоновых процессов. Методы EDR анализируют журналы, созданные в результате серии действий, предпринятых злоумышленником перед началом полномасштабной атаки, и используют эти журналы и анализ для обнаружения вторжений и формирования защитных ответов. [5].

Эта технология решает проблему постоянного мониторинга и эффективного реагирования на сложные угрозы безопасности.

2) UEBA (User and Entity Behavior Analytics) - технология выявления киберугроз, основанная на анализе поведения пользователей, а также устройств, приложений и иных объектов в информационной системе. [6]

«Поведенческий анализ пользователей и сущностей» (UEBA) использует машинное обучение для моделирования поведения пользователей и сущностей, пытаясь обнаружить аномальное поведение, которое может быть признаком кибератаки. Решения UEBA обычно собирают информацию о среднем ожидаемом поведении пользователей и организаций из различных источников. Как только эта информация отфильтрована и предварительно обработана, можно установить базовую линию поведения пользователя с помощью шаблонов или отпечатков пальцев. Затем решения UEBA осуществляют непрерывный мониторинг поведения пользователей и организаций, чтобы сравнить его с базовым поведением. [7]

Мы рассмотрели основные существующие методы и инструменты для обнаружения и анализа инцидентов ИБ, однако их список на этом не ограничивается. Каждый из инструментов следует выбирать в соответствии с определенными условиями в организации.

Под инцидентом информационной безопасности (ИБ) понимается одно или серия нежелательных событий ИБ, которые имеют значительную вероятность компрометации бизнес-операций и угрожают информационной безопасности [1].

Такие события как: прерывания бизнес-процессов, нарушения конфиденциальности, целостности или доступности активов организации – являются последствия инцидентов ИБ, которые, в ходе реализации угроз могут возникнуть преднамеренно или случайно. Данные инциденты приводят к потере производительности и ущербу с точки зрения как материальных затрат, так и репутации [8].

Для оценки последствий инцидентов информационной безопасности необходимо идентифицировать возможные инциденты и разработать сценарии их развития.

В таких сценариях должны быть предусмотрены нежелательные события, вызывающие инциденты, а также защитные меры, которые могут предотвратить инциденты. Кроме того, необходимо учесть последствия инцидента, то есть конечные результаты или последствия инцидента. Для каждого сценария должны быть определены меры по предотвращению негативных событий информационной безопасности, меры по сдерживанию и устранению последствий инцидента, а также меры по восстановлению после него. [9]

По данным компании Positive Technologies самыми распространёнными категориями жертв являются [10]:

Госучреждения – 18%; промышленность – 13%; наука и образование – 7%; медицинские учреждения – 7%; транспорт – 6%; IT-компании – 5%; сфера услуг – 4%; блокчейн-проекты – 4%; другие – 36%

Также следует определить причину, по которой возникают инциденты ИБ в организациях: шпионаж с целью получения данных; финансовая выгода для злоумышленника; промежуточное звено (использование организации как инструмент для достижения иной цели); политика. Ещё компания Positive technologies выделяет следующие последствия инцидентов ИБ для организаций и частных лиц [11] (рис. 2).

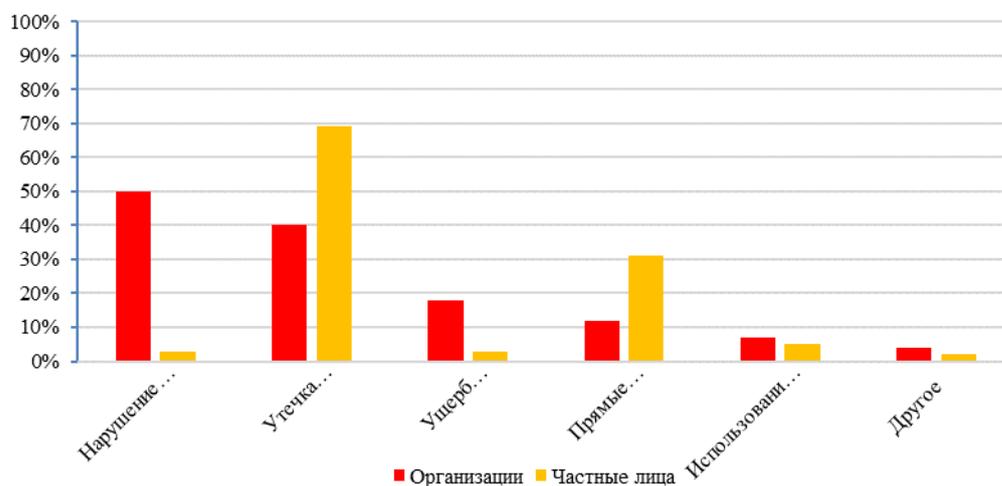


Рис. 2. Последствия инцидентов информационной безопасности

Fig. 2. Consequences of information security incidents

Следует отметить, что причины возникновения инцидентов информационной безопасности могут быть разнообразными и определяются целями злоумышленников. Важно понимать, что последствия таких инцидентов могут существенно отличаться и оказывать непосредственное влияние на организации. Понимание причин и последствий инцидентов информационной безопасности поможет организациям более осознанно и эффективно разрабатывать свои стратегии защиты и улучшать свою информационную безопасность [12,13].

**Обсуждение результатов.** Изучив рекомендации от различных компаний, организаций и интеграторов в сфере ИБ мы сделали вывод, что для создания эффективной системы обнаружения и реагирования на инциденты информационной безопасности рекомендуется принять следующие меры:

**Мониторинг:** необходимо разработать систему мониторинга, которая будет контролировать действия и события в информационной среде организации. Следует включить мониторинг сетевого трафика, журналов событий, системных ресурсов и других релевантных источников данных. Это поможет обнаружить подозрительные действия и аномалии.

**Системы обнаружения угроз:** нужно реализовать специализированные инструменты и

программное обеспечение для обнаружения и анализа потенциальных угроз информационной безопасности. Такие системы включают в себя различные средства для обнаружения угроз.

*Сценарии и критерии:* необходимо написать сценарии и определить критерии, которые будут служить основой для определения инцидентов информационной безопасности. Это поможет быстро обнаруживать инциденты ИБ, а также моментально реагировать на них, благодаря заранее определённым действиям по тому или иному сценарию.

*Отдел по реагированию на инциденты:* следует сформировать команду, которая будет отвечать за обнаружение, анализ и реагирование на инциденты информационной безопасности. Эта команда должна иметь достаточные знания и навыки в области информационной безопасности и быть готовой к оперативным действиям при возникновении инцидента. Она может быть как в составе организации, так и по найму. Чаще всего подобными решениями являются SOC или ГРИИБ (группа реагирования на инциденты ИБ)

*План реагирования на инциденты:* сценарии пишутся для автоматизированных решений по реагированию на инциденты. Однако оно может быть и традиционное – вручную, для этого как раз и нужны планы. Нужно разработать документированные планы реагирования на различные типы инцидентов, включить в них процедуры по обнаружению, исследованию, устранению и восстановлению после инцидента.

*Аудиты и обновления:* важно проводить регулярные аудиты системы обнаружения и реагирования на инциденты, чтобы убедиться в ее эффективности. Обновляйте системы и инструменты, следите за новыми угрозами и обновленными методами атак. Также следует проводить Pentest (тестирование на проникновение) - метод оценки безопасности компьютерных систем или сетей средствами моделирования атаки злоумышленника, чтобы найти слабые места в системе, которые могут привести к инцидентам ИБ.

*Обучение сотрудников:* не меньшим приоритетом является организация обучения и осведомления сотрудников об угрозах информационной безопасности, процедурах обнаружения и реагирования на инциденты. Следует регулярно напоминать о политиках и процедурах безопасности и обучать сотрудников правилам использования информационных ресурсов. Также при создании системы обнаружения и реагирования на инциденты информационной безопасности необходимо учитывать специфику организации, ее ресурсы и потребности.

**Вывод.** В данной статье мы разработали базовые рекомендации по созданию эффективной системы обнаружения и реагирования на инциденты ИБ. Обладая такой системой, организации могут не бояться кибератак, целью которых может быть утечка информации. Однако не стоит забывать, что создать абсолютно защищенную систему невозможно, а злоумышленники придумывают новые методы взлома и виды атак на компании.

Наше исследование сосредоточилось на анализе существующих методов и инструментов для обнаружения и анализа инцидентов ИБ, а также их последствий на работу компании или организации. Мы также уделили особое внимание разработке практических рекомендаций, которые будут доступны и понятны всем, а в частности организациям, не связанным с ИБ сферой.

Результаты исследования позволяют разработать простые и понятные рекомендации по созданию эффективной системы обнаружения и реагирования на инциденты ИБ, которые будут полезны для всех, в том числе для лиц, не связанных с областью информационной безопасности.

Наш подход имеет новизну в том, что он предлагает реальные практические рекомендации для создания эффективной системы реагирования на инциденты ИБ. Мы понимаем, что многие компании и организации могут не обладать необходимыми знаниями и навыками в области ИБ, и им сложно разбираться в технической документации. Поэтому мы стремимся предоставить понятные и удобные рекомендации, которые помогут им

выполнять свои бизнес-задачи без вреда для информационной безопасности.

Таким образом, данное исследование будет способствовать улучшению уровня защиты информации и снижению рисков, связанных с ИБ, в различных компаниях и организациях.

#### Библиографический список:

1. ГОСТ Р ИСО/МЭК ТО 18044–2007 - Национальный стандарт российской федерации. Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Менеджмент инцидентов информационной безопасности (<https://docs.cntd.ru/document/1200068822>)
2. Реагирование на инциденты (Incident Response). // Электронная энциклопедия Касперского. URL: <https://encyclopedia.kaspersky.ru/glossary/incident-response/> (дата обращения 16.05.23)
3. Рахметов Р. SIEM системы (Security Information and Event Management) - что это и зачем нужно? // Электронный блог компании Security Vision. URL: <https://www.securityvision.ru/blog/siem-chto-eto-i-zachem-nuzhno/> (дата обращения: 16.05.23)
4. SOAR (Security Orchestration, Automation and Response). // Электронная энциклопедия Касперского. URL: <https://encyclopedia.kaspersky.ru/glossary/security-orchestration-automation-and-response-soar/> (дата обращения: 17.05.23)
5. Na-Eun Park, Yu-Rim Lee, Soyoung Joo, So-Yeon Kim, So-Hui Kim, Ju-Young Park, Seo-Yi Kim, Il-Gu Lee. Performance evaluation of a fast and efficient intrusion detection framework for advanced persistent threat-based cyberattacks. //Международная база цитирования Science Direct. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045790622007637> (дата обращения: 18.05.23)
6. UEBA. // Электронная энциклопедия Касперского. URL: <https://encyclopedia.kaspersky.ru/glossary/ueba/> (дата обращения: 19.05.23)
7. Alejandro G. Martín, Marta Beltrán, Alberto Fernández-Isabel, Isaac Martín de Diego. An approach to detect user behaviour anomalies within identity federations. //Международная база цитирования Science Direct. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167404821001802> (дата обращения: 18.05.23)
8. Писаренко И. Выявление инцидентов информационной безопасности. // Information security: сетевой журнал, URL: <https://lib.itsec.ru/articles2/control/vyyavlenie-incidentov-informacionnoy-bezopasnosti> (дата обращения: 19.05.23)
9. Щербакова А.Ю., Зефилов С.Л. Сценарии инцидента сбора информации // Материалы II Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых «Молодежь и наука: модернизация и инновационное развитие страны»: электронное научн. издание. - ФГУП НТИЦ «Информрегистр», Депозитарий электронных изданий. - 2012. - С. 769-772.
10. Актуальные киберугрозы: II квартал 2022 года. // Электронный ресурс компании Positive Technologies, URL: <https://www.ptsecurity.com/ru-ru/research/analytics/cybersecurity-threatscape-2022-q2/> (дата обращения: 19.05.23)
11. Крючков А.В., Прус Ю.В., Резниченко С.А., Технологические основы национальной информационной безопасности // Сборник статей, Международной научно-практической конференции Российского государственного гуманитарного университета. 2018. С. 58-63.
12. Резниченко С.А., Сиротский А.А. Формализованная модель аудита информационной безопасности организации на предмет соответствия требованиям стандартов // Безопасность информационных технологий, 2021. Том.28, №3. С. 103–117.
13. Резниченко С.А., Дмитриева Т.В., Подкосов С.В., Евдокимов О.Г., Семухин С.Д. Проблемы управления информационной безопасностью в кредитно-банковской системе передачи данных // Московский экономический журнал. 2022. № 2. URL: <https://qje.su/ekonomicheskaya-teoriya/moskovskij-ekonomicheskij-zhurnal-2-2022-36/> (дата обращения: 19.05.23)

#### References

1. GOST R ISO/IEC TO 18044–2007. National standard of the russian federation. Information technology. Methods and means of ensuring security. Information Security incident management (<https://docs.cntd.ru/document/1200068822>)
2. Incident Response. Kaspersky Electronic Encyclopedia. URL: <https://encyclopedia.kaspersky.ru/glossary/incident-response/> (accessed 16.05.23)
3. Rakhmetov R. SIEM systems (Security Information and Event Management) - what is it and why is it needed? Electronic blog of Security Vision company. URL: <https://www.securityvision.ru/blog/siem-chto-eto-i-zachem-nuzhno/> (accessed 16.05.23)
4. SOAR (Security Orchestration, Automation and Response). Kaspersky Electronic Encyclopedia. URL: <https://encyclopedia.kaspersky.ru/glossary/security-orchestration-automation-and-response-soar/>(accessed 17.05.23)
5. Na-Eun Park, Yu-Rim Lee, Soyoung Joo, So-Yeon Kim, So-Hui Kim, Ju-Young Park, Seo-Yi Kim, Il-Gu Lee. Performance evaluation of a fast and efficient intrusion detection framework for advanced persistent threat-based cyberattacks. International quotation Database Science Direct. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045790622007637> (accessed 18.05.23)

6. UEBA. Kaspersky Electronic Encyclopedia. URL: <https://encyclopedia.kaspersky.ru/glossary/ueba/> (accessed 19.05.23)
7. Alejandro G. Martín, Marta Beltrán, Alberto Fernández-Isabel, Isaac Martín de Diego. An approach to detect user behaviour anomalies within identity federations. // International quotation Database Science Direct. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167404821001802> (accessed 18.05.23)
8. Pisarenko I. Identification of information security incidents. // Information security. (In Russ) Available at: <https://lib.itsec.ru/articles2/control/vyyavlenie-incidentov-informacionnoy-bezopasnosti> (accessed 19.05.23)
9. Shcherbakova A.Y., Zefirov S.L. Scenarios of the information gathering incident. Materials of the II International Scientific and Practical Conference of students and young scientists “Youth and science: modernization and innovative development of the country”: electronic scientific journal. edition. FSUE STC “Informregister”, Depository of electronic publications. 2012; 769-772.
10. Current cyber threats: The second quarter of 2022. Electronic resource of Positive Technologies company, URL: <https://www.ptsecurity.com/ru-ru/research/analytics/cybersecurity-threatscape-2022-q2/> (accessed 19.05.23)
11. Kruchkov A.V., Prus Y.V., Reznichenko S.A., Technological foundations of national information security. *Collection of articles, International scientific and Practical Conference of the Russian State University for the Humanities*. 2018; 58-63.
12. Reznichenko S.A., Sirotskiy A.A. A formalized model of an organization’s information security audit for compliance with the requirements of standards. *Information Technology Security*, 2021; 28(3):103-117.
13. Reznichenko S.A., Dmitrieva T.V., Podkosov S.V., Evdokimov O.G., Semuhin S.D. Problems of information security management in the credit and banking data transmission system // *Moscow Economic Journal*. 2022. №2 URL: <https://qje.su/ekonomicheskaya-teoriya/moskovskij-ekonomicheskij-zhurnal-2-2022-36/> (accessed 19.05.23)

#### **Сведения об авторах:**

Трофимов Даниил Олегович, студент направления подготовки «Информационная безопасность банковских автоматизированных систем»; [daniil.trofimov.1986@mail.ru](mailto:daniil.trofimov.1986@mail.ru) ORCID.org/ 0009-0005-2606-7734

Шепелев Матвей Сергеевич, студент направления подготовки «Информационная безопасность банковских автоматизированных систем»; [matvey20031106@gmail.com](mailto:matvey20031106@gmail.com) ORCID.org/ 0009-0009-1800-8469

Резниченко Сергей Анатольевич, кандидат технических наук, доцент; [rsa\\_5@bk.ru](mailto:rsa_5@bk.ru) ORCID.org/0000-0002-1539-0457

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

Daniil O. Trofimov, Student in the direction of training “Information security of automated banking systems” [daniil.trofimov.1986@mail.ru](mailto:daniil.trofimov.1986@mail.ru) ORCID.org/ 0009-0005-2606-7734 Matvey S. Shepelev, Student in the direction of training “Information security of automated banking systems” [matvey20031106@gmail.com](mailto:matvey20031106@gmail.com) ORCID.org/ 0009-0009-1800-8469

Sergey A. Reznichenko, Cand.Sci.(Eng.), Assoc.Prof.; [rsa\\_5@bk.ru](mailto:rsa_5@bk.ru) ORCID.org/0000-0002-1539-0457

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

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

**Поступила в редакцию/ Received 05.09.2023.**

**Одобрена после рецензирования / Revided 30.09.2023.**

**Принята в печать /Accepted for publication 30.09.2023.**

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ**  
**INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS**

УДК 303.732.4



DOI: 10.21822/2073-6185-2023-50-4-158-165 Оригинальная статья /Original article

**Анализ архитектуры нейронной сети PointNet**

**Л.А. Щенявская<sup>1</sup>, Д.А. Гура<sup>1,2</sup>, Р.А. Дьяченко<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Кубанский государственный технологический университет,

<sup>1</sup>350072, г. Краснодар, ул. Московская, 2, Россия,

<sup>2</sup>Кубанский государственный аграрный университет,

<sup>2</sup>350044, г. Краснодар, ул. имени Калинина 13, Россия

**Резюме. Цель.** Большинство исследователей преобразуют данные облаков точек в обычные трехмерные воксельные сетки или коллекции изображений, что делает данные излишне объемными и вызывает проблемы при их обработке. Целью исследования является проведение анализа архитектуры нейронной сети PointNet. **Метод.** Применен единый подход к решению различных задач трехмерного распознавания, начиная от классификации объектов, сегментации деталей и заканчивая семантическим анализом сцены. **Результат.** Проведен сравнительный анализ классификации 2d и 3d объектов, подробно изучены слои и функции, благодаря которым происходит классификация. Рассмотрен тип нейронной сети, которая непосредственно использует облака точек, что хорошо учитывает инвариантность перестановок точек во входных данных. Определено, что сеть обеспечивает унифицированную архитектуру для приложений, начиная от классификации объектов, сегментации деталей и заканчивая семантикой сцены. Для семантической сегментации входными данными может быть, как отдельный объект из сегментации области детали, так и небольшая часть 3D-сцены. Нейронная сеть, которая широко используется для редактирования растровых изображений, графического дизайна и цифрового искусства представляет собой глубокую архитектуру облака точек под названием PointNet. **Вывод.** Представлена новая глубокая архитектура облака точек PointNet. Для задачи классификации объектов облако входных точек непосредственно выбирается из формы или предварительно сегментируется из облака точек сцены. Для получения виртуальной модели реального мира используются нейросетевые решения, основанные на предположении, что имеется RGB облако точек, полученное RGB-D камерой с одного или нескольких ракурсов.

**Ключевые слова:** облако точек, трехмерное пространство, архитектура PointNet, входные данные, пространственные объекты, задачи классификации и сегментации, глобальная функция, визуализация данных

**Для цитирования:** Л.А. Щенявская, Д.А. Гура, Р.А. Дьяченко. Анализ архитектуры нейронной сети PointNet. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023; 50(4):158-165. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-4-158-165

**Analysis of the PointNet neural network architecture**

**L.A. Schenyavskaya<sup>1</sup>, D.A. Gura<sup>1,2</sup>, R.A. Dyachenko<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Kuban State Technological University,

<sup>1,2</sup> Moskovskaya St., Krasnodar 350072, Russia,

<sup>2</sup> Kuban State Agrarian University,

<sup>2,13</sup> Kalinin St., Krasnodar 350044, Russia

**Abstract. Objective.** Most researchers convert point cloud data into ordinary three-dimensional voxel grids or image collections, which makes the data unnecessarily voluminous and causes problems when processing them. The purpose of the study is to analyze the architecture of the PointNet neural network. **Method.** A unified approach has been applied to solving various

3D recognition problems, ranging from object classification, detail segmentation to semantic scene analysis. **Result.** A comparative analysis of the classification of 2d and 3d objects was carried out, the layers and functions through which classification occurs were studied in detail. A type of neural network is considered that directly uses point clouds, which takes into account the invariance of permutations of points in the input data. The network is determined to provide a unified architecture for applications ranging from object classification, part segmentation, and scene semantics. For semantic segmentation, the input data can be either a single object from the part area segmentation or a small part of the 3D scene. A neural network that is widely used for raster image editing, graphic design, and digital art is a deep point cloud architecture called PointNet. **Conclusion.** A new deep point cloud architecture, PointNet, is introduced. For object classification task, the input point cloud is directly selected from the shape or pre-segmented from the scene point cloud. To obtain a virtual model of the real world, neural network solutions are used, based on the assumption that there is an RGB point cloud obtained by an RGB-D camera from one or several angles.

**Keywords:** point cloud, three-dimensional space, PointNet architecture, input data, spatial objects, classification and segmentation tasks, global function, data visualization

**For citation:** L.A. Schenyavskay, D.A. Gura, R.A. Dyachenko. Analysis of the PointNet neural network architecture. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2023; 50(4): 158-165. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-4-158-165

**Введение.** При появлении приложений, требующих наличие трехмерной среды и взаимодействия с трехмерными объектами, возникла потребность в технологии глубокого обучения, адаптированной к трехмерным данным. Однако, в отличие от изображения, которое имеет доминирующее представление в виде двумерных пиксельных массивов, трехмерное изображение имеет множество различных представлений. Облако точек является наиболее близким трехмерным представлением к необработанным данным датчиков. Оно также представлено в канонической форме, что означает возможность легкого преобразования трехмерных представлений в облака точек. Большинство существующих функций для работы с облаком точек созданы для решения конкретных задач (табл. 1).

Таблица 1. Характеристика функций облаков точек [1]

Table 1. Characteristics of point cloud functions [1]

Наименование/ Name	Поддерживает текстуру/ Supports texture	Уровень/ Level
PFH (Point Feature Histograms)	НЕТ/NO	Местный/ Local
FPFH (Fast Point Feature Histograms)	НЕТ/NO	Местный/ Local
VFH (Vector Field Histogram)	НЕТ/NO	Глобальный/ Global
CVFH (Clustered Viewpoint Feature Histogram)	НЕТ/NO	Региональный/ Regional
RIFT(radiation-variation insensitive feature transform)	ДА/ YES	Местный/ Local

**Постановка задачи.** Рассмотрим подробно сеть PointNet, которая обеспечивает простую унифицированную архитектуру для приложений. Она обеспечивает единый подход к решению различных задач трехмерного распознавания (рис. 1), начиная от классификации объектов, сегментации деталей и заканчивая семантическим анализом сцены.

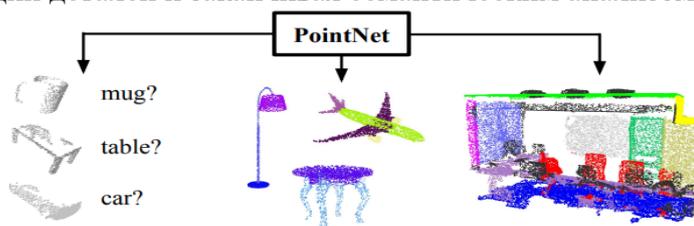


Рис. 1. Задачи, решаемые архитектурой PointNet [2]

Fig. 1. Tasks solved by the PointNet architecture [2]

Необходимо классифицировать 3d объект, но как именно это делать и насколько это отличается от классификации 2d объектов. Классификация в двумерном виде изображения представляется в виде матрицы или тензора.

**Методы исследования.** Популярным методом является сверточная нейронная сеть (CNN) (рис. 2). Из двумерного изображения можно изучить функции с помощью операций свертки и ввести нелинейность с помощью функций активации, таких как ReLU. Затем объединение можно использовать для уменьшения размерности и сохранения пространственной инвариантности. Слой свертки и слой пула генерируют высокоуровневые функции входного изображения. Затем полносвязные слои используют эти функции для классификации входного изображения. Выходной слой производит вероятности для каждого класса. Класс с наибольшей вероятностью является предсказанным классом для входного изображения [3].

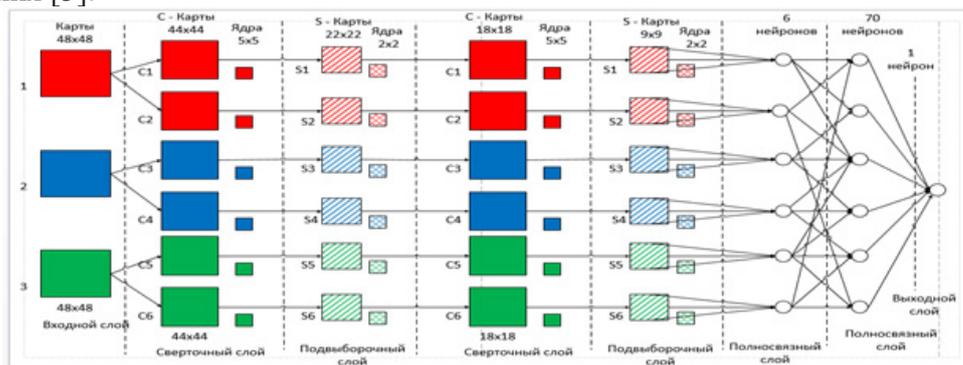


Рис. 2. Интерпретация сверточной нейронной сети [3]

Fig. 2. Interpretation of a convolutional neural network [3]

Классификация двумерных облаков точек представлена довольно просто, но необходимо разобраться как выполняется классификация 3d объектов и как представлены данные на входном уровне. Обратимся к нейронной сети PointNet – популярному методу классификации 3d объектов, на которые в научной литературе ссылаются более 5000 раз [4-8].

**Обсуждение результатов.** Нейронная сеть PointNet – это глубокая нейронная сеть, предложенная для работы с 3D-объектами. Она была представлена в 2017 году в работе “PointNet: Deep Learning on Point Sets for 3D Classification and Segmentation” авторами Charles R. Qi, Hao Su, Kaichun Mo и Leonidas J. Guibas [2]. Для начала необходимо рассмотреть концепцию, а затем реализацию PyTorch вместе с архитектурой PointNet для лучшего понимания. Начать следует с облака точек, в котором содержится «n» точек. Облако точек – это набор отдельных точек в трехмерном пространстве, где каждая точка представлена своей координатой в плоскости XYZ [9]. Облака точек возникают во многих задачах и позволяют понять, как выглядит окружающий трёхмерный мир. По этой причине размер входных данных равен  $n \times 3$ . Затем входные точки преобразуются входной трансформаторной сетью.

Основная идея этой сети преобразователей состоит в том, чтобы совместить входное облако точек с каноническим пространством. Итак, для чего же выполняется выравнивание? Ответ на поставленный вопрос содержится в определении облака точек. Облако точек – это простой набор точек в трехмерном пространстве и, следовательно, инвариантно к перестановкам его членов [9].

В нейронной сети используется симметричная функция для агрегирования информации с каждой точки, поскольку необходимо, чтобы облако точек было инвариантным к определенным геометрическим преобразованиям, таким как жесткое преобразование, отражение, вращение и перемещение [10].

Для выполнения такого выравнивания к входным координатам точек применяется аффинное преобразование, здесь T-Net используется для прогнозирования. T-Net – трансформаторная сеть, состоящая из базовых модулей независимого от точек [11]. Для облака точек геометрическое преобразование – это просто умножение матриц. Итак, здесь

в основном входные данные перемножаются с входной матрицей, затем в каждую точку встраивается многослойный перцептрон (MLP), который независимо захватывает локальные особенности для каждой точки. Это основной блок сети PointNet, который используется для обработки каждой точки в облаке точек. Он состоит из нескольких полносвязных слоев и функции активации ReLU (формула 1, рис. 3) [12]. Он обрабатывает каждую точку входных данных независимо и объединяет их в единый вектор признаков.

$$\text{ReLU}(x) = \max(0, x) \quad (1)$$

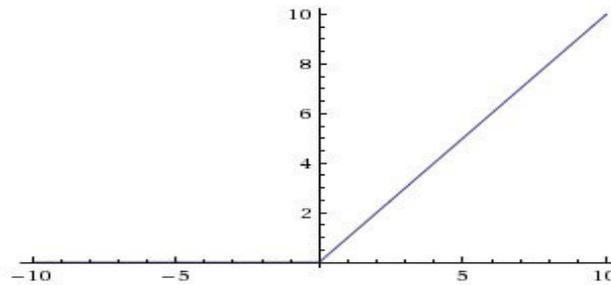


Рис. 3. График функции ReLu [12]

Fig. 3. Graph of the ReLU function [12]

Затем применяется преобразование пространственных объектов. Как и входное преобразование, преобразование объектов используется для выравнивания точек в пространстве встраивания. Однако преобразование пространственных объектов немного отличается. Преобразование пространственных объектов выполняет встраивание в гораздо более высоких измерениях, что значительно усложняет оптимизацию [13]. Именно поэтому к потерям при обучении softmax добавляется член регуляризации, чтобы сделать оптимизацию стабильной (формула 2).

$$L_{reg} = \|I - AA^T\|_F^2, \quad (2)$$

где  $A$  – предсказанная матрица выравнивания признаков;

$I$  – матрица идентичности.

Слой softmax: используется для распределения вероятностей между различными классами. Функция представлена в формуле (3), а ее график на рисунке 4.

$$\sigma(z)_i = \frac{e^{z_i}}{\sum_{k=1}^K e^{z_k}}, \quad (3)$$

где  $K$  указывает на количество классов;

$z$  – входной вектор

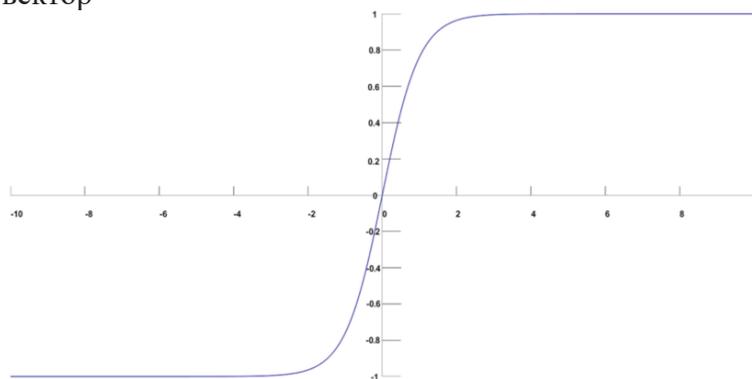


Рис. 4. График функции SoftMax [14]

Fig. 4. Graph of the SoftMax function [14]

Затем каждая точка снова преобразуется в другое пространство вложения, что происходит при помощи многослойного перцептрона размеров. После этого используется функция Max Pooling (максимальное объединение) для объединения всех точек в многомерном пространстве встраивания для вывода глобального вектора признаков [15], пример работы этой функции представлен на рис. 5.

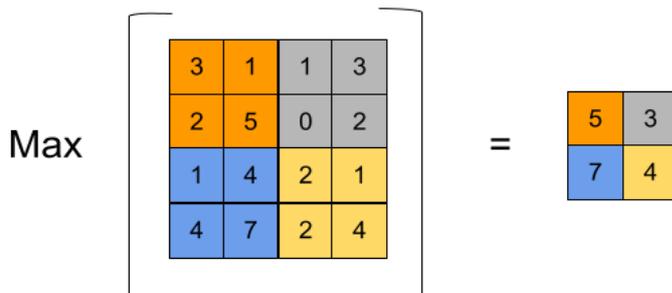


Рис. 5. Функция Max Pooling [16]

Fig. 5. Max Pooling Function [16]

Были проведены эксперименты с другими операциями симметрии, такими как объединение среднего значения и взвешенная сумма на основе внимания, и оказалось, что максимальное объединение (Max Pooling) значительно эффективнее (табл.2).

Таблица 2. Сравнение операций симметрии [2]

Table 2. Comparison of symmetry operations

Наименование/ Name	accuracy
MLP (unsorted input)	24.2
MLP (sorted input)	45.0
LSTM	78.5
Attention sum	83.0
Average pooling	83.8
Max pooling	<b>87.1</b>

Наконец, глобальный вектор обновляется многоуровневым перцептроном для вывода оценок классификации для k классов. Класс с наибольшей вероятностью является предсказанным классом для входного облака точек. Архитектура сети PointNet, рассмотренная в статье [2], представлена на рис. 6.

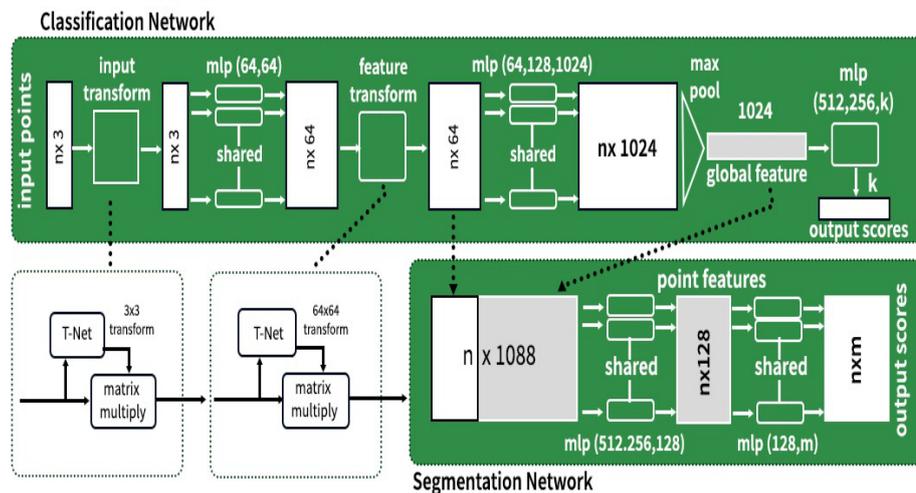


Рис. 6. Архитектура сети PointNet [2]

Fig. 6. Architecture of the Paint net network [2]

Для распространения данной архитектуры на сегментацию, необходимо спрогнозировать оценки класса по каждому баллу. Простой, но эффективный способ сделать это – объединить локальные вложения и глобальные векторы объектов [17].

Для каждой точки можно выбрать локальное вложение с глобальным вектором объектов и использовать его для классификации по точкам, а затем вывести m баллов по каждой точке для проведения сегментации [18].

На рис. 7 показаны некоторые результаты сегментации частей объекта из набора данных параметров shipnet как при частичном, так и при полном вводе.

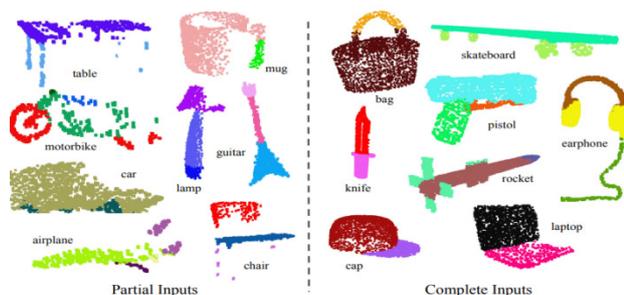


Рис. 7. Результаты сегментации деталей [2]

Fig. 7. Results of segmentation of parts [2]

В количественном отношении нейронная сеть PointNet также превзошла предыдущий уровень техники, используя традиционные функции, а также базовую линию с использованием трехмерной сегментации пути объекта CNN [2] (табл.3).

Таблица 3. Результаты классификации по ModelNet 40 [2]

Table 3. Classification results by ModelNet 40 [2]

Наименование/ Name	input	#views	accuracy avg. class	accuracy overall
SPH	mesh	-	68.2	-
3DShapeNets	volume	1	77.3	84.7
VoxNet	volume	12	83.0	85.9
Subvolume	volume	20	86.0	<b>89.2</b>
LFD	image	10	75.5	-
MVCNN	image	80	<b>90.1</b>	-
baseline	point	-	72.6	77.4
PointNet	point	1	86.2	<b>89.2</b>

Так же сеть способна четко сегментировать различные семантические области. Помимо высокой производительности в области трехмерного распознавания, сеть также устойчива к повреждению данных, посторонним точкам и точечным возмущениям [19]. Что касается облака точек, то определяется набор точек во входных данных, которые вносят свой вклад в глобальную функцию. Это подмножество точек называют набором критических точек, которые при визуализации составляют основу [20].

Более того, есть возможность найти точки в пространстве, которые не повлияют на глобальный объект. Эти точки не ограничиваются набором входных данных. Любой набор точек, расположенный между набором точек кратера и набором верхних границ, приведет к одному и тому же глобальному векторному объекту.

Это объясняет, почему сеть PointNet настолько устойчива к различным повреждениям данных, таким как пропущенные данные или точечные возмущения. Так же показана аналогичная визуализация для всех категорий выборок. Точка  $p$  по-прежнему способна улавливать основные контуры и ключевые структуры, а это означает, что изучение объектов хорошо обобщается на невидимые категории.

**Вывод.** Разработчики сети предложили новую глубокую архитектуру облака точек под названием PointNet. Для задачи классификации объектов облако входных точек непосредственно выбирается из формы или предварительно сегментируется из облака точек сцены.

Как правило, для получения виртуальной модели реального мира используются нейросетевые решения, основанные на предположении, что имеется RGB облако точек, полученное RGB-D камерой с одного или нескольких ракурсов. В статье были продемонстрированы теоретические и экспериментальные результаты, подтверждающие правильность разработки сети.

**Библиографический список:**

1. Можаяев А. Н. Сегментация облаков точек с помощью средств библиотеки point cloud library / А. Н. Можаяев // Экстремальная робототехника. – 2018. – Т. 1, № 1. – С. 301-308. – EDN YNCUTJ
2. Zhu X. X., Tuia D., Mou L., Xia G. S., Zhang L., Xu F., Fraundorfer F. Deep Learning in Remote Sensing: A Comprehensive Review and List of Resources // IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine. – 2017. – P. 8–36. DOI: 10.1109/MGRS.2017.2762307
3. Ферлитш Э. Шаблоны и практика глубокого обучения / пер. с англ. А. В. Логунова. – М.: ДМК Пресс, 2022. – 538 с. ISBN 978-5-93700-113-9
4. Алиев Р.М., Мирзофат О.Н. «Сравнительный анализ применения методов обработки облаков точек PointNet и PointNet++ для задачи сегментации 3D-объектов» // Труды Института системного программирования РАН. - 2020. - Т. 29. - № 1. - С. 37-54.
5. Мельник С.П., Иванов И.В. «Анализ метода PointNet для задачи сегментации трехмерных объектов» // Информационные технологии и компьютерная инженерия. - 2018. - Т. 16. - № 5. - С. 951-960.
6. Федоров В.И., Поповкин В.В. «Сверточные нейронные сети в задаче классификации облаков точек» // Вестник Российской академии наук. - 2019. - Т. 89. - № 5. - С. 428-436.
7. Курманбаев Б.Б. «Применение метода PointNet для классификации трехмерных объектов» // Вестник КазНТУ. - 2019. - № 4(134). - С. 111-117.
8. Хаустов А.М., Прыгульский М.В. «Анализ предложенной архитектуры PointNet» // Информационные системы и технологии. - 2019. - № 4(98). - С. 49-57.
9. Гура Д.А., Дьяченко Р.А., Хушт Н.И. К вопросу о предобработке данных трехмерного лазерного сканирования // Электронный сетевой политематический журнал «Научные труды КубГТУ». 2021. № 3. С. 39-46. EDN: GKDDTK
10. Гура Д.А., Дьяченко Р.А., Хушт Н.И., Марковский И.Г. К вопросу о методах генерации, классификации и распознавания трехмерных изображений // Электронный сетевой политематический журнал «Научные труды КубГТУ». 2021. № 2. С. 86-97. EDN: KNEICL
11. Гура Д.А., Дьяченко Р.А., Андрущенко А.В. Технология имитации полетного маршрута беспилотного летательного аппарата и воздушного лазерного сканирования // Электронный сетевой политематический журнал «Научные труды КубГТУ». 2022. № 6. С. 126-133. EDN: QPPBDL
12. Кадров И. В. Виды функций активации для обучения свёрточных нейронных сетей / И. В. Кадров, Л. Б. Кижнер // Вопросы устойчивого развития общества. – 2022. – № 6. – С. 1109-1115. – EDN TELYIU.
13. Косолапов П.А., Дьяченко Р.А., Гура Д.А., Хушт Н.И. К вопросу о нормализации данных трехмерного лазерного сканирования // Электронный сетевой политематический журнал «Научные труды КубГТУ». 2021. № 4. С. 56-66. EDN: ILVHIQ
14. Свитов Д. В. Дистилляция моделей для распознавания лиц, обученных с применением функции Софтмакс с отступами / Д. В. Свитов, С. А. Алямкин // Автоматика и телемеханика. – 2022. – № 10. – С. 35-46. – DOI 10.31857/S000523102210004X. – EDN AJXJDG.
15. Krizhevsky I., Sutskever G. E., Hinton. Imagenet classification with deep convolutional neural networks. Communications of the ACM, 60(6):84–90, May 2017. ISSN 0001-0782, 1557-7317. doi: 10.1145/3065386.
16. Малашин Р. О. Глава 12. Современные нейронные сети глубокого обучения для автоматического анализа изображений / Р.О. Малашин, С. В. Пономарев // Нейротехнологии : коллективная монография. – Санкт-Петербург : ВВМ, 2018. – С. 271-335. – EDN DHAIFS.
17. Маенраа Т. The local binary pattern approach to texture analysis – Extensions and Applications. - Oulu University Press, 2003.
18. Zaganidis A., Sun L., Duckett T., Cielniak G. Integrating Deep Semantic Segmentation into 3-D Point Cloud Registration // IEEE Robotics and Automation Letters. – 2018. – Vol. 3, No. 4. – P. 2942–2949. DOI:10.1109/LRA.2018.2848308
19. Орлова С. Р. Трехмерное распознавание: текущее состояние и тенденции / С. Р. Орлова, А. В. Лопота // Автоматика и телемеханика. – 2022. – № 4. – С. 5-26. – DOI 10.31857/S000523102204002X. – EDN AAALWB.
20. Березовский Б. А., Барышников Ю. М., Борзенко В. И., Кемпнер Л. М. Многокритериальная оптимизация: Математические аспекты / Б. А. Березовский, Ю. М. Барышников, В. И. Борзенко, Л. М. Кемпнер. М.: Наука, 1989. - 128 с. - ISBN 5-02-006543-9

**References**

1. Mozhaev A. N. Segmentation of point clouds by means of the point cloud library. *Extreme robotics*. 2018; 1(1):301-308. – EDN YNCUTJ (In Russ)
2. Zhu X. X., Tuia D., Mou L., Xia G. S., Zhang L., Xu F., Fraundorfer F. Deep Learning in Remote Sensing: A Comprehensive Review and List of Resources. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*. 2017; 8–36. DOI: 10.1109/MGRS.2017.2762307
3. Ferrit S. E. Patterns and practice of deep learning / translated from English by A.V. Logunov. – М.: ДМК Press, 2022; 538. ISBN 978-5-93700-113-9(In Russ)

4. Aliyev R.M., Morozova O.N. "Comparative analysis of the application of point cloud processing methods Paint Net and Paint Net++ for the task of segmentation of 3D objects". *Proceedings of the Institute of System Programming of the Russian Academy of Sciences*. 2020; 29(1):37-54. (In Russ)
5. Melnik S.P., Ivanov I.V. Analysis of the PointNet method for the task of segmentation of three-dimensional objects". *Information technologies and computer engineering*. 2018; 16( 5): 951-960. (In Russ)
6. Fedorov V.I., Popovkin V.V. "Convolutional neural networks in the problem of point cloud classification" *Bulletin of the Russian Academy of Sciences*. 2019; 89(5):428-436. (In Russ)
7. Kurmanbaev B.B. "Application of the PointNet method for classification of three-dimensional objects" *Bulletin of KazNTU*. 2019; 4(134): 111-117. (In Russ)
8. Khaustov A.M., Prygulsky M.V. "Analysis of the proposed PointNet architecture". *Information systems and technologies*. 2019; 4(98): 49-57. (In Russ)
9. Gura D.A., Dyachenko R.A., Khusht N.I. On the issue of preprocessing three-dimensional laser scanning data. *Electronic network polythematic journal "Scientific works of KubSTU"*. 2021; 3:39-46. EDN: GKDDTK (In Russ)
10. Gura D.A., Dyachenko R.A., Khusht N.I., Markovsky I.G. On the methods of generation, classification and recognition of three-dimensional images. *Electronic network polythematic journal "Scientific works of KubSTU"*. 2021; 2: 86-97. EDN: KNEICL (In Russ)
11. Gura D.A., Dyachenko R.A., Andryushchenko A.V. Technology of flight route simulation of an unmanned aerial vehicle and aerial laser scanning. *Electronic network polythematic journal "Scientific works of KubSTU"*. 2022; 6: 126-133. EDN: QPPBDL (In Russ)
12. Cadres I. V. Types of activation functions for training convolutional neural networks / I. V. Cadres, L. B. Kizhner. *Issues of sustainable development of society*. 2022; 6: 1109-1115. – EDN TELYIO. (In Russ)
13. Kosolapov P.A., Dyachenko R.A., Gura D.A., Khusht N.I. On the normalization of three-dimensional laser scanning data. *Electronic network polythematic journal "Scientific works of KubSTU"*. 2021; 4: 56-66. EDN: ILVHIQ (In Russ)
14. Svitov D. V. Distillation of models for face recognition trained using the Softmax function with indents / D. V. Svitov, S. A. Alyamkin. *Automation and telemechanics*. 2022; 10:35-46. – DOI 10.31857/S000523102210004X. – EDN AJXJDG. (In Russ)
15. Krizhevsky I., Sutskever G. E. Hinton. Imagenet classification with deep convolutional neural networks. *Communications of the ACM*, 60(6):84–90, May 2017. ISSN 0001-0782, 1557-7317. doi: 10.1145/3065386.
16. Malashin R. O. Chapter 12. Modern neural networks of deep learning for automatic image analysis / R. O. Malashin, S. V. Ponomarev. *Neurotechnologies : a collective monograph*. St. Petersburg : VVM, 2018; 271-335. – EDN DHAIFS. (In Russ)
17. Maenpaa T. The local binary pattern approach to texture analysis – Extensions and Applications. Oulu University Press, 2003.
18. Zaganidis A., Sun L., Duckett T., Cielniak G. Integrating Deep Semantic Segmentation into 3-D Point Cloud Registration. *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2018;3(4): 942–2949. DOI:10.1109/LRA.2018.2848308
19. Orlova S. R. Three-dimensional recognition: current state and trends / S. R. Orlova, A.V. Lopota. *Automation and telemechanics*. 2022; 4: 5-26. DOI 10.31857/S000523102204002X. – EDN AAALWB. (In Russ)
20. Berezovsky B. A., Baryshnikov Yu. M., Borzenko V. I., Kempner L. M. Multicriteria optimization: Mathematical aspects / B. A. Berezovsky, Yu. M. Baryshnikov, V. I. Borzenko, L. M. Kempner. M.: Nauka, 1989; 128.- ISBN 5-02-006543-9 (In Russ)

**Сведения об авторах:**

Щенявская Людмила Андреевна, лаборант кафедры кадастра и геоинженерии; yudmela2311@mail.ru  
Гура Дмитрий Андреевич, кандидат технических наук, доцент кафедры кадастра и геоинженерии; gda-kuban@mail.ru

Дьяченко Роман Александрович, доктор технических наук, профессор кафедры информатики и вычислительной техники; emessage@rambler.ru

**Information about authors:**

Lyudmila A. Shchenyavskaya, Laboratory assistant, Department of Cadastre and Geoengineering; Lyudmela2311@mail.ru

Dmitry A. Gura, Cand. Sci.(Eng.), Assoc.Prof.; Department of Cadastre and Geoengineering; gda-kuban@mail.ru  
Roman A. Dyachenko, Dr. Sci.(Eng.), Prof., Department of Informatics and Computer Engineering; emessage@rambler.ru

**Конфликт интересов / Conflict of interest.**

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

**Поступила в редакцию/ Received 05.09.2023.**

**Одобрена после рецензирования / Reviced 30.09.2023.**

**Принята в печать /Accepted for publication 30.09.2023.**

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА  
BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 697.245.37

DOI: 10.21822/2073-6185-2023-50-4-166-174



Оригинальная статья /Original article

**CFD-анализ воздушных потоков и температур на базе газолучистого отопления  
в промышленных условиях**

**Е.С. Аралов, Б.М. Кумицкий**

Воронежский государственный технический университет,  
394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84, Россия

**Резюме. Цель.** Исследование направлено на изучение сложного взаимодействия между лучистым отоплением и воздушными потоками в промышленных помещениях. Цель состоит в том, чтобы понять динамику температуры, уделяя особое внимание оптимизации энергоэффективности и комфорта в производственных помещениях, отапливаемых двухзонным темным газолучистым обогревателем. **Метод.** Используя Computational Fluid Dynamics (CFD) и программу Ansys для моделирования, в исследовании была разработана модель, представляющая типичные промышленные условия. Этот метод включал определение и проверку параметров температурных градиентов и скорости воздуха, а также тщательное картирование сложностей процесса промышленного нагрева. **Результат.** Анализ обеспечивает подробные графические представления температуры и скорости воздуха в отдельных точках, раскрывая влияние лучистого отопления на модели воздушных потоков. Особое внимание было уделено тому, как температурные профили взаимодействуют с двухзонной системой отопления, раскрывая важные данные, которые помогают понять тепловую динамику в промышленных помещениях. **Вывод.** Полученные данные демонстрируют потенциал для значительного прогресса в области энергосбережения и повышения комфорта работников в промышленных условиях, использующих лучистое отопление. Комплексный подход исследования заполняет критический пробел в существующих исследованиях, подчеркивая необходимость и потенциал для дальнейшего изучения технологий устойчивого отопления в сложных промышленных условиях.

**Ключевые слова:** лучистое отопление, энергоэффективность, обогрев, Ansys fluent, воздушные потоки, тепловой комфорт

**Для цитирования:** Е.С. Аралов, Б.М. Кумицкий. CFD-анализ воздушных потоков и температур на базе газолучистого отопления в промышленных условиях. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023; 50(4): 166-174. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-4-166-174

**CFD analysis of air flows and temperatures based on radiant heating  
in industrial environments**

**E.S. Aralov, B.M. Kumicki**

Voronezh State Technical University,  
84 20th Anniversary of October St., Voronezh 394006, Russia

**Abstract. Objective.** The study aims to investigate the complex interaction between radiant heating and airflow in industrial environments. The aim is to understand the dynamics of temperature, with particular attention to optimizing energy efficiency and comfort in industrial premises heated by a dual-zone dark gas radiant heater. **Method.** Using Computational Fluid Dynamics (CFD) and Ansys simulation software, the study developed a model that represents typical industrial conditions. This method included the determination and verification of temperature gradients and air velocity parameters, as well as careful mapping of the complexities of the industrial heating process. **Result.** The analysis provides detailed graphical representations of temperature and air

velocity at individual points, revealing the effect of radiant heating on airflow patterns. Particular attention has been paid to how the temperature profiles interact with a dual-zone heating system, revealing important data that helps understand thermal dynamics in industrial environments. **Conclusion.** The findings demonstrate the potential for significant progress in energy savings and improved worker comfort in industrial environments using radiant heating. The integrated research approach fills a critical gap in existing research, highlighting the need and potential for further exploration of sustainable heating technologies in challenging industrial environments.

**Key words:** radiant heating, energy efficiency, heating, Ansys fluent, air flow, thermal comfort

**For citation:** E.S. Aralov, B.M. Kumicki. CFD analysis of air flows and temperatures based on radiant heating in industrial environments. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2023; 50(4): 166-174. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-4-166-174

**Введение.** Системы лучистого отопления становятся все более используемы в промышленных условиях, предлагая повышенную энергоэффективность и комфорт, в отличие от их предшественников, а именно от традиционных систем теплоснабжения. Эти системы обычно основаны на циркуляции нагретого воздуха, что может привести к неравномерному распределению температуры, создавая горячие и холодные точки в помещении. Этот неравномерный нагрев часто приводит к потерям энергии, поскольку система изо всех сил пытается поддерживать постоянную температуру. Кроме того, традиционные методы отопления могут способствовать ухудшению качества воздуха за счет циркуляции пыли, аллергенов и других загрязняющих веществ, что потенциально влияет на здоровье и комфорт жильцов. Обслуживание таких систем может быть сложным и дорогостоящим, требуя регулярной очистки и обслуживания воздухопроводов и фильтров. Потери энергии также распространены в традиционных системах, особенно если в воздуховоде есть утечка, что еще больше снижает эффективность.

По мере усложнения производственных помещений первостепенное значение приобретают точный контроль и понимание распределения температурных полей и воздушных потоков в этих помещениях [1]. Применение двухзонных темных газолучистых обогревателей открыло уникальные возможности в управлении температурным режимом. Хотя их потенциал энергосбережения является многообещающим, всесторонний анализ их влияния на воздушный поток и распределение температуры отсутствует [2-5].

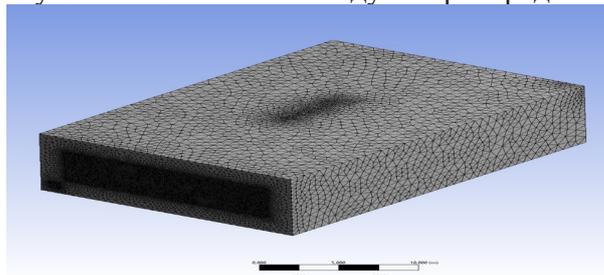
Использование вычислительной гидрогазодинамики (CFD) и специализированных инструментов, таких как программный комплекс Ansys fluent, предлагает путь к решению всесторонних проблем. Комплексы CFD предлагают множество преимуществ, особенно при анализе и моделировании течения жидкости, теплообмена и связанных явлений. Одним из основных преимуществ CFD является его способность моделировать сложную геометрию и модели потока, которые могут быть непрактичными или слишком дорогими для изучения с помощью физических экспериментов [6-8].

Это исследование направлено на изучение взаимодействия между лучистым отоплением и режимами воздушного потока в промышленных помещениях, уделяя особое внимание тонкостям температурных профилей и влиянию на энергосбережение и комфорт человека. Проводя тщательное исследование температуры и скорости воздуха в отдельных точках, исследование направлено на устранение существующих пробелов в знаниях, способствуя более широкому пониманию тепловой динамики в современных производственных условиях [9,10].

**Постановка задачи.** Данная статья связана со сложным взаимодействием воздушного потока и температуры в производственном помещении, отапливаемом двухзонным газолучистым отопителем. В производственном помещении эффективность и экономичность системы отопления должны быть сбалансированы со сложной динамикой движения воздуха, на которую влияют различные факторы, такие как планировка помещения, размещение оборудования и сама система отопления. Традиционные системы отопления

могут привести к неравномерному распределению температуры, потенциальным потерям энергии и некомфортным условиям труда. Уникальное сочетание лучистого отопления со сложностью промышленных воздушных потоков представляет собой многогранную проблему, требующую глубокого понимания гидрогазодинамики, механизмов теплопередачи и реальных ограничений. Исследование направлено на то, чтобы найти решение этой сложной проблемы, предлагая путь к улучшенному управлению температурным режимом в промышленных условиях.

**Методы исследования.** Изменения расхода воздуха и температуры в производственном помещении, отапливаемом двухзонной конструкцией газолучистого излучателя, охватывают несколько комплексных и взаимосвязанных подходов. Первоначально разрабатывается подробное геометрическое представление помещения с учетом конкретного расположения и ориентации нагревательных элементов, механизмов, окон, дверей и любых других конструкций, которые могут влиять на потоки воздуха и распределение температуры (рис. 1).



**Рис.1. Сеточная модель частного случая производственного помещения с выделением особо важных зон**  
**Fig.1. Grid model of a particular case of a production facility with the allocation of particularly important areas**

Вычислительная гидрогазодинамика (CFD) является важнейшим этапом в анализе, где моделирование воздушного перемещения включает моделирование турбулентных и ламинарных потоков, вязкости, градиентов давления и взаимодействия между воздухом и твердыми структурами. Граничные условия тщательно определены, представляя реальные условия, такие как температура на входе и выходе, температура стен и характер систем отопления.

Лучистое отопление тщательно моделируется, чтобы отразить теплообмен между газовыми лучистыми обогревателями и окружающим воздухом, а также воздействие нагрева на близлежащие поверхности. Конвекция, теплопроводность и излучение учитываются в тепловом анализе, обеспечивая всестороннее представление об изменениях температуры. Модели турбулентности могут применяться, если поток имеет турбулентные характеристики, предлагая более точное изображение сложных моделей потока, часто встречающихся в промышленных условиях. Выбор между различными моделями турбулентности, такими как  $k-\epsilon$  или  $k-\omega$ , зависит от конкретного режима потока и доступных экспериментальных или эмпирических данных для проверки [11-14].

Моделирование проводится с использованием специализированного программного обеспечения, такого как Ansys, с использованием численных методов для решения основных уравнений потока жидкости и теплообмена. Моделирование в зависимости от времени может быть выполнено для регистрации переходных режимов воздушного потока и температуры. Наконец, проверка результатов моделирования осуществляется путем сравнения с экспериментальными данными, если они имеются, или с установленными эмпирическими корреляциями. Также можно провести анализ чувствительности, чтобы понять, как изменения таких параметров, как интенсивность отопления, планировка помещения или внешние погодные условия, могут повлиять на результаты [3,7,15].

Вместе эти методы исследования образуют надежный и многогранный подход к анализу динамики воздушного потока и температуры в промышленном помещении, предлагая ценную информацию о влиянии лучистой системы отопления и помогая оптимизировать стратегии обогрева. Рассмотрим основные уравнения и физические законы, которые тесно связаны с процессом воздухообмена, теплопроводности и изменением температуры в

помещении. Такая расчетная последовательность покажет прямые зависимости от исходных параметров. Уравнение Навье-Стокса с учетом силы тяжести (то есть второй закон Ньютона для единичной массы воздуха) имеет вид:

$$\frac{1}{\rho} \nabla p = \nu \Delta V + g \quad (1)$$

где  $\rho$  - плотность воздуха;  $\nabla$  - оператор набла;  $p$  - давление;  $\nu$  - кинематическая вязкость;  $\Delta$  - оператор Лапласа;  $g$  - ускорение свободного падения.

Стационарное уравнение непрерывности имеет вид:

$$\frac{dT}{dt} = V \nabla T = a \Delta T. \quad (2)$$

К ним нужно добавить еще стационарное уравнение теплопроводности:

$$\frac{dT}{dt} = V \nabla T = a \Delta T. \quad (3)$$

где  $a$  - коэффициент температуропроводности воздуха (он связан с коэффициентом теплопроводности  $\lambda$  соотношением:  $a = \frac{\lambda}{\rho c_p}$ ),

где  $c_p$  - теплоемкость при постоянном давлении

В отсутствие конвекции ( $V=0$ ) из (1) имеем для невозмущенного давления известную барометрическую формулу:

$$p_0(x) = p_0(0) - \rho_0 g x. \quad (5)$$

Аналогично из (3) получим  $\Delta T_0 = 0$  откуда находим линейный закон изменения температуры с высотой

$$T_0(x) = T_0(1 - \frac{x}{L}). \quad (6)$$

Уравнения решаются численными методами, а в программе Ansys, применяются граничные условия, отражающие конкретную производственную среду и систему отопления. Интегрируя эти конкретные формулы, методология исследования предлагает всесторонний и точный подход к пониманию моделей воздушных потоков и их взаимодействия с системой лучистого отопления.

**Обсуждение результатов.** Проведем анализ графического представления, который демонстрирует пять различных графиков, отображающих зависимость температуры от высоты помещения. Первый график (рис. 2) представляет расположение непосредственно под газолучистым обогревателем, показывает однородность температуры, значения которой лишь незначительно колеблются между 294,3 К и 293,7 К. Эта однородность демонстрирует эффективность системы лучистого отопления в поддержании стабильных тепловых условий в окрестности ее работы

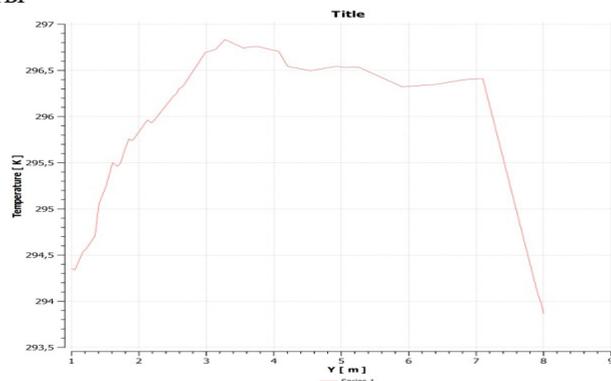
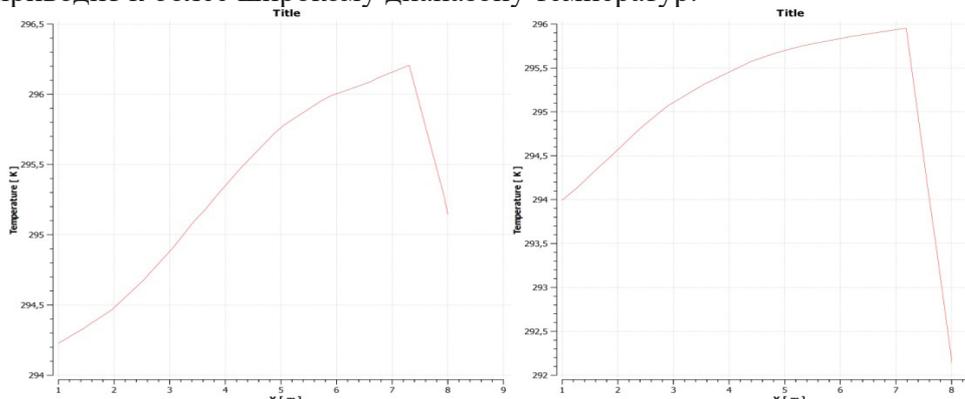


Рис. 2. Данные значений температур под газолучистым обогревателем  
Fig. 2. Data of temperature values under the gas-fired heater

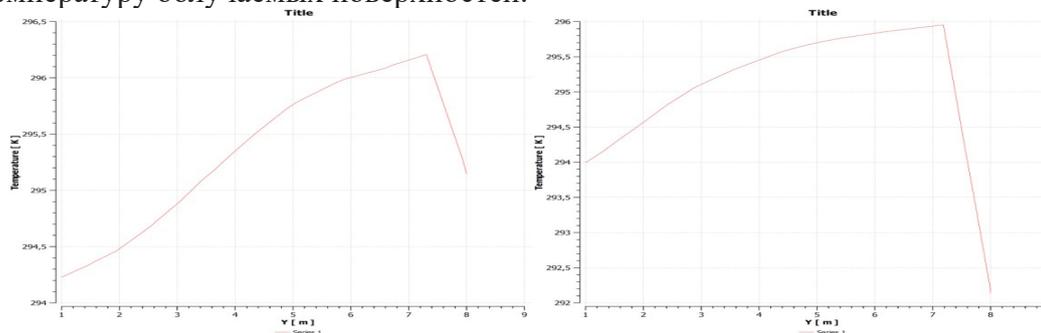
Следующие два графика (рис. 3), которые расположены поперечно в трех метрах от обогревателя, представляют более динамичный диапазон температур, изменяющийся от 294,2 К до 302,2 К. Это значительное увеличение может быть связано с влиянием отражателей в конструкции отопителя, которые усиливают нагревательный эффект и, таким образом, приводит к более широкому диапазону температур.



**Рис. 3. Данные значений температур в поперечном сечении на расстоянии трех метров от излучателя**

**Fig. 3. Data of temperature values in the cross section at a distance of three meters from the emitter**

Последние два графика (рис.4), представляющие продольное расположение точек на расстоянии пяти метров от нагревателя, показывают разные результаты. Первый, демонстрирует температуры в диапазоне от 294,2 К до 295,1 К, что отражает умеренные колебания. Второй график со значениями температуры от 294 К до 292,2 К указывает на более низкий диапазон. На это снижение, вероятно, влияет близость к приточно-вытяжной вентиляции в помещении, поскольку поток воздуха из вентиляционной системы будет снижать температуру облучаемых поверхностей.



**Рис. 4. Данные значений температур в продольном сечении на расстоянии пяти метров от излучателя**

**Fig. 4. Data of temperature values in the longitudinal section at a distance of five meters from the emitter**

В совокупности эти графические идеи раскрывают сложное взаимодействие между лучистым отоплением, отражателями и вентиляцией в помещении. Локальная однородность, влияние отражателей и вентиляция - все это способствует созданию многогранного теплового комфорта в промышленном пространстве. Результаты подчеркивают важность учета пространственного распределения различных элементов в помещении, включая обогреватели, отражатели и точки вентиляции, для полного понимания и управления тепловым поведением в промышленной среде.

Следующие графические изображения в совокупности дают тонкое представление о сложной динамике воздушного потока, на которую влияет газовый инфракрасный обогреватель и другие пространственные элементы в помещении. На первом графике (рис. 5), расположенном непосредственно под лучистым обогревателем, показаны значения скорости воздуха в диапазоне от 0,188 м/с до 0,325 м/с, что иллюстрирует непосредственное влияние лучистого обогрева на воздушный поток. Это может означать, что помимо лучистого теплообмена присутствуют и конвекционные потоки за счет нагрева рефлекторов

и отражателей конфигурация которых представлена в статьях [2,3,4,6], вызванные системой отопления, где температурный градиент заставляет воздух циркулировать быстрее вблизи обогревателя.

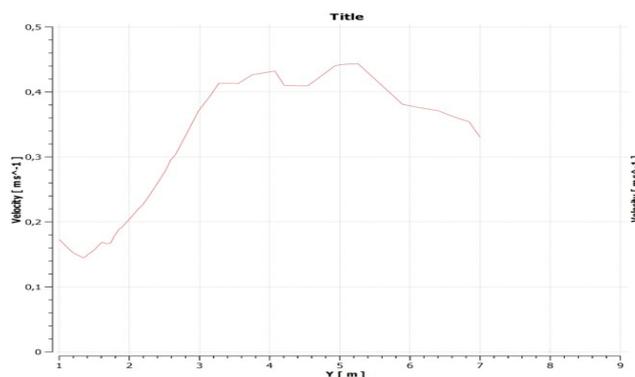


Рис. 5. Данные значений скоростей воздушных потоков под газолучистым обогревателем

Fig. 5. Data on air flow velocities under a radiant gas heater

На следующей паре графиков (рис. 6), расположенных поперек трех метров от нагревателя, представлены скорости от 0,12 м/с до 0,15 м/с. Эти относительно постоянные и умеренные скорости могут указывать на стабилизацию движения воздуха на этом расстоянии, возможно, под влиянием баланса между нагревом и аэродинамикой помещения.

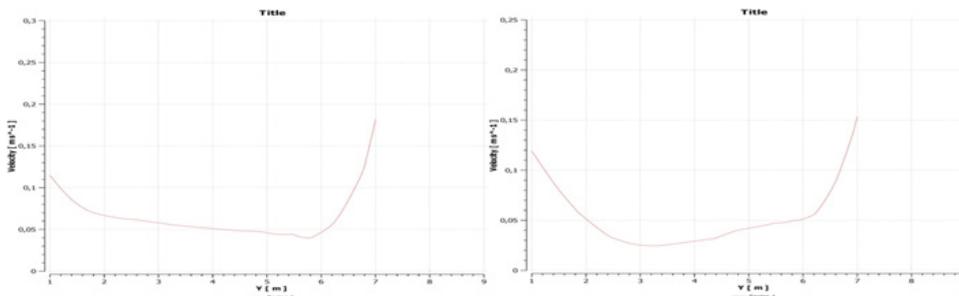


Рис. 6. Данные значений скоростей воздушных потоков в поперечном сечении на расстоянии трех метров от излучателя

Fig. 6. Data on cross-sectional air flow velocities at a distance of three meters from the emitter

Последние два графика (рис. 7), представляющие скорости в продольном направлении в пяти метрах от нагревателя, показывают более разные результаты.

Первый, показывает скорости от 0,052 м/с до 0,08 м/с, отражая уменьшенное влияние нагревателя на этом расстоянии. Второй, со скоростями от 0,15 м/с до 0,04 м/с, заметно выше, что, вероятно, связано с близостью к приточной вентиляции, усиливающей поток воздуха в этой области.

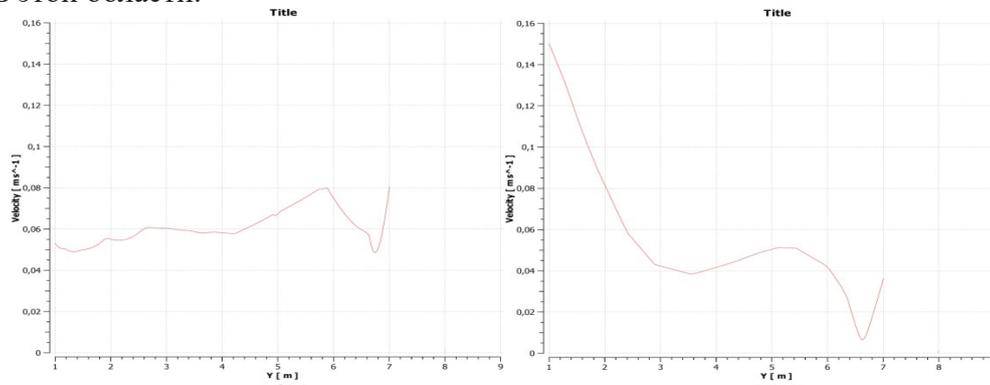


Рис.7. Данные значений скоростей воздушных потоков в продольном сечении на расстоянии пяти метров от излучателя

Fig.7. Data on air flow velocities in a longitudinal section at a distance of five meters from the emitter

**Вывод.** В заключении можно сказать, что результаты проведенного исследования подчеркивают сложную взаимосвязь между системой отопления, геометрией помещения и вентиляцией. Они подчеркивают прямое влияние лучистого обогревателя на близлежащие воздушные потоки и температурную равномерность, сдерживающее влияние динамики помещения на промежуточных расстояниях и особую роль вентиляции в формировании моделей воздушных потоков.

Представленный материал охватывает целостное понимание взаимодействия между воздушным потоком и температурой в помещении промышленного назначения, особенно с акцентом на влияние эффективной конструкции газолучистого обогревателя. Благодаря тщательному анализу вычислительной гидрогазодинамики (CFD) и подробному изучению графических представлений исследование раскрывает многогранную динамику, определяющую как скорость воздуха, так и распределение температуры.

Однородность температуры, наблюдаемая непосредственно под обогревателем, подчеркивает эффективность лучистого обогрева, тогда как колебания температуры на разных расстояниях от обогревателя подчеркивают влияние отражателей и вентиляции на тепловое поведение. Зависимость воздушного потока от высоты помещения, а также сложное взаимодействие между обогревателем, планировкой помещения и вентиляцией дает представление о контроле и оптимизации условий окружающей среды в промышленных помещениях.

Кроме того, исследование подчеркивает важность использования передовых инструментов моделирования, таких как Ansys fluent, в сочетании с точным моделированием турбулентных и ламинарных потоков, механизмов теплопередачи и реальных ограничений. Этот комплексный подход обеспечивает всестороннее представление о сложной тепловой среде в промышленном помещении, что позволяет принимать решения в стратегиях отопления на основе полученных данных.

#### Библиографический список:

1. Аралов Е.С. Обеспечение теплового комфорта в помещениях ресторанных комплексов // Научная опора воронежской области : Сборник трудов победителей конкурса научно-исследовательских работ студентов и аспирантов ВГТУ по приоритетным направлениям развития науки и технологий, Воронеж, 03–28 апреля 2017 года. – Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2017. – С. 95-96.
2. Чуйкин С.В., Аралов Е.С. Разработка конструкции и совершенствование методики расчёта двухзонного тёмного газолучистого обогревателя для отопления промышленных и общественных помещений // Сантехника, Отопление, Кондиционирование. – 2023. – № 2(254). – С. 29-31.
3. Аралов Е.С. Оптимизация конструкции газолучистого обогревателя темного типа // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. – 2023. – № 1(24). – С. 55-61. – DOI 10.36622/VSTU.2023.24.1.006.
4. Аралов Е.С., Чуйкин С.В. Эффективная конструкция двухзонного темного газолучистого обогревателя // Математическое и экспериментальное моделирование физических процессов : Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Биробиджан, 15 декабря 2022 года / Под научной редакцией В.М. Козина. – Биробиджан: Приамурский государственный университет им. Шолом-Алейхема, 2023. – С. 62-66.
5. Аралов Е.С., Куницкий Б.М., Бугаевский Д.О. Эффективность теплоизоляционных материалов, применяемых при строительстве наружных ограждающих конструкций // Градостроительство. Инфраструктура. Коммуникации. – 2021. – № 4(25). – С. 26-31.
6. Патент на полезную модель № 213700 U1 Российская Федерация, МПК F24D 5/08, F23M 9/04, F28D 1/047. Двухзонный темный газолучистый обогреватель : № 2022118249 : заявл. 04.07.2022 : опубл. 23.09.2022 / С. В. Чуйкин, Е. С. Аралов.
7. Калинина А.И., Макаров А.Р., Аралов Е.С. Особенности формирования микроклимата в помещениях с повышенной влажностью, с учетом теплотехнических характеристик ограждающих конструкций // Инновации и инвестиции. – 2021. – № 3. – С. 256-259.
8. Aralov E.S., Kumitsky V.M., Kutsigina O.A., Dorniyak O.R. Modeling of the thermal state of a room when using the heating structure of a two-zone dark gas-beam heater // Russian Journal of Building Construction and Architecture. – 2023. – No. 3(59). – P. 16-24. – DOI 10.36622/VSTU.2023.3.59.002.

9. Kumitskiy V., Tul'skaya S., Morozov V., Aralov E., Budnikov V. Hydrodynamics of the Flow of an Ideal Liquid When It Flows Out of the Bottom Hole of a Parabolic Tank // *Modern Problems in Construction : Selected Papers from MPC 2021, Kursk, November 18–19, 2021.* – Cham: Springer Nature Switzerland AG, 2023. – P. 225-232.
10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023617539 Российская Федерация. Программа расчета коэффициента облучения при лучистом теплообмене прямоугольного обогревателя с элементарной площадкой : № 2023616247 : заявл. 28.03.2023 : опубл. 11.04.2023 / С.В. Чуйкин, Е.А. Копытина, Е.С. Аралов, С.О. Харин ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный технический университет».
11. Павлов М.В., Бутовский И.Н. Повышение эффективности системы лучистого отопления теплицы с использованием газовых инфракрасных излучателей // БСТ: Бюллетень строительной техники. – 2019. – № 6(1018). – С. 36-38.
12. Золотаревский С.А. Газовое лучистое отопление - радикальное решение для повышения энергоэффективности и конкурентоспособности промышленных предприятий // Автоматизация и ИТ в энергетике. – 2018. – № 5(106). – С. 46-51.
13. Каштанова Д.С., Ивашкевич А.А. Воздушное отопление складских помещений // Новые идеи нового века: материалы международной научной конференции ФАД ТОГУ. – 2022. – Т. 2. – С. 287-292.
14. Богословский, В.Н. Тепловой режим гражданских зданий // АВОК: Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика. – 2023. – № 4. – С. 4-17.
15. Смыков А.А. Тепловой и температурный режим помещений с системами отопления на основе водяных инфракрасных излучателей // Приволжский научный журнал. – 2021. – № 2(58). – С. 98-106.
16. Климанов, В.А. Дозиметрическое планирование лучевой терапии : учебное пособие для студентов высших учебных заведений / В. А. Климанов ; В. А. Климанов. – Москва : Московский инженерно-физ. ин-т (гос. ун-т), 2008. – 175 с. – ISBN 978-5-7262-0969-2.
17. Бухмиров В.В., Крупенников С.А., Солнышкова Ю.С. Модификации зонального метода для решения задач радиационного теплообмена: основные положения // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2009. – № 2. – С. 61-63.
18. Бодров В.И., Бодров М.В., Смыков А.А. Исследование систем лучистого отопления на базе низкотемпературных инфракрасных излучателей // Приволжский научный журнал. – 2019. – № 3(51). – С. 52-57.
19. Идрисов А.З. Перспективы применения газовых инфракрасных излучателей в районах Крайнего Севера // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 1997. – № 3. – С. 55-57.
20. Семикашев, В. В. Теплоснабжение в России: текущая ситуация и проблемы инвестиционного развития // ЭКО. – 2019. – № 9(543). – С. 23-47.
21. Глушков А.Ю., Полосин И.И. Расчет газовых лучистых обогревателей для помещений сложной конфигурации // Сантехника, Отопление, Кондиционирование. – 2013. – № 11(143). – С. 56-57.

#### References

1. Aralov E.S. Ensuring thermal comfort in the premises of restaurant complexes. Scientific support of the Voronezh region: Collection of works of the winners of the competition of research works of students and graduate students of VSTU in priority areas of science and technology development, Voronezh, April 03–28, 2017. Voronezh: Voronezh State Technical University, 2017; 95-96. (In Russ)
2. Chuikin S.V., Aralov E.S. Development of the design and improvement of the methodology for calculating a two-zone dark gas-radiant heater for heating industrial and public premises. *Plumbing, Heating, Air Conditioning*. 2023; 2 (254); 29-31. (In Russ)
3. Aralov E.S. Optimization of the design of a gas-radiant heater of a dark type. *Housing and communal infrastructure*. 2023; No. 1(24); 55-61. – DOI 10.36622/VSTU.2023.24.1.006. (In Russ)
4. Aralov E.S., Chuikin S.V. Effective design of a two-zone dark gas-radiant heater. Mathematical and experimental modeling of physical processes: *Collection of materials of the All-Russian scientific and practical conference with international participation*, Birobidzhan, December 15, 2022; Under the scientific editorship of V.M. Kozin. Birobidzhan: Priamursky State University. Sholom Aleichem; 2023; 62-66. (In Russ)
5. Aralov E.S., Kumitskiy B.M., Bugaevsky D.O. Efficiency of heat-insulating materials used in the construction of external building envelopes. *Urban planning. Infrastructure. Communications*. 2021; 4 (25); 26-31. (In Russ)
6. Utility model patent No. 213700 U1 Russian Federation, IPC F24D 5/08, F23M 9/04, F28D 1/047. Two-zone dark gas-radiant heater: No. 2022118249: Appl. 07/04/2022 : publ. 23.09.2022; S. V. Chuikin, E. S. Aralov. (In Russ)
7. Kalinina A.I., Makarov A.R., Aralov E.S. Features of microclimate formation in rooms with high humidity, taking into account the thermal characteristics of building envelopes. *Innovations and investments*. 2021; 3; 256-259. (In Russ)
8. Aralov E.S., Kumitskiy B.M., Kutsigina O.A., Dorniyak O.R. Modeling of the thermal state of a room when

- using the heating structure of a two-zone dark gas-beam heater. *Russian Journal of Building Construction and Architecture*. 2023; 3(59); 16-24. – DOI 10.36622/VSTU.2023.3.59.002.
9. Kumitskiy B., Tul'skaya S., Morozov V., Aralov E., Budnikov V. Hydrodynamics of the Flow of an Ideal Liquid When It Flows Out of the Bottom Hole of a Parabolic Tank. *Modern Problems in Construction : Selected Papers from MPC 2021, Kursk, November 18–19, 2021*; Cham: Springer Nature Switzerland AG, 2023; 225-232.
  10. Certificate of state registration of the computer program No. 2023617539 Russian Federation. The program for calculating the irradiation coefficient for radiant heat transfer of a rectangular heater with an elementary platform: No. 2023616247: Appl. 03/28/2023 : publ. 04/11/2023 / S.V. Chuikin, E.A. Kopytina, E.S. Aralov, S.O. Kharin; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Voronezh State Technical University".(In Russ)
  11. Pavlov M.V., Butovsky I.N. Improving the efficiency of the greenhouse radiant heating system using gas infrared emitters. *BST: Bulletin of construction equipment*. 2019; 6 (1018); 36-38. (In Russ)
  12. Zolotarevsky S.A. Gas radiant heating - a radical solution to improve energy efficiency and competitiveness of industrial enterprises. *Automation and IT in the energy sector*. 2018; 5 (106); 46-51. (In Russ)
  13. Kashtanova D.S., Ivashkevich A.A. Air heating of warehouse premises. *New ideas of the new century: materials of the international scientific conference FAD TOGU*. 2022; 2; 287-292. (In Russ)
  14. Bogoslovsky, V.N. Thermal regime of civil buildings. *AVOK: Ventilation, heating, air conditioning, heat supply and building thermal physics*. 2023; 4; 4-17. (In Russ)
  15. Smykov A.A. Thermal and temperature regime of premises with heating systems based on water infrared emitters. *Privolzhsky scientific journal*. 2021; 2 (58); 98-106. (In Russ)
  16. Klimanov, V.A. Dosimetric planning of radiotherapy : textbook for students of higher educational institutions. VA Klimanov ; V. A. Klimanov. - Moscow: Moscow Engineering Physics. in-t (state university), 2008; 175; – ISBN 978-5-7262-0969-2. (In Russ)
  17. Bukhmirov V.V., Krupennikov S.A., Solnyshkova Yu.S. Modifications of the zonal method for solving problems of radiative heat transfer: basic provisions. *Bulletin of the Ivanovo State Power Engineering University*. 2009; 2; 61-63. (In Russ)
  18. Bodrov V.I., Bodrov M.V., Smykov A.A. Study of radiant heating systems based on low-temperature infrared emitters. *Privolzhsky scientific journal*. 2019; 3 (51); 52-57. (In Russ)
  19. Idrisov A.Z. Prospects for the use of gas infrared emitters in the regions of the Far North. *News of higher educational institutions. Oil and gas*. 1997; 3; 55-57. (In Russ)
  20. Semikashev, VV Heat supply in Russia: current situation and problems of investment development. *EKO*. 2019; 9 (543); 23-47. (In Russ)
  21. Glushkov A.Yu., Polosin I.I. Calculation of gas radiant heaters for premises of complex configuration. *Plumbing, Heating, Air conditioning*. 2013; 11 (143); 56-57. (In Russ)

#### **Сведения об авторах:**

Егор Сергеевич Аралов аспирант, старший преподаватель кафедры теплогазоснабжения и нефтегазового дела; [vgtu.aralov@yandex.ru](mailto:vgtu.aralov@yandex.ru); AuthorID: 1010588 ORCID 0000-0002-0974-0801

Борис Михайлович Кумицкий, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры теплогазоснабжения и нефтегазового дела; [boris-kum@mail.ru](mailto:boris-kum@mail.ru); AuthorID: 615658 ORCID 0000-0001-8135-8431

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

Egor S. Aralov, Postgraduate student, Senior Lecturer, Department of Heat and Gas Supply and Oil and Gas Business; [vgtu.aralov@yandex.ru](mailto:vgtu.aralov@yandex.ru); AuthorID: 1010588 ORCID 0000-0002-0974-0801

Boris M. Kumitsky, Cand. Sci. (Physical and Mathematical), Assoc. Prof., Department of Heat and Gas Supply and Oil and Gas Business; [boris-kum@mail.ru](mailto:boris-kum@mail.ru); AuthorID: 615658 ORCID 0000-0001-8135-8431

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

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

**Поступила в редакцию/ Received 25.09.2023.**

**Одобрена после рецензирования / Revised 17.10.2023.**

**Принята в печать /Accepted for publication 17.10.2023.**

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА  
BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 691.16

DOI: 10.21822/2073-6185-2023-50-4-175-183



Обзорная статья / Review article

**Использование битуминозных пород и природных битумов  
с точки зрения геоники**

**М.А. Высоцкая, А.В. Курлыкина, В.А. Токарев**

Белгородский государственный технологический университет имени В.Г. Шухова,  
308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46, Россия

**Резюме. Цель.** Цель работы заключается в исследовании опыта использования битуминозных пород из различных месторождений для приготовления горячего асфальтобетона или извлечения битума из пород с точки зрения геоники. **Метод.** В качестве методов исследования используются: систематизация, описание и анализ. Необходимые данные формируются на основе информации, полученной по результатам анализа отечественных и зарубежных статей, связанных с темой природных битумов и практического опыта по извлечению битума из битуминозного песка для приготовления горячей асфальтобетонной смеси с использованием битуминозных пород без применения нефтяного битума из различных месторождений. **Результат.** Рассмотрены различные работы по приготовлению горячего асфальтобетона и битума из битуминозных пород. Полученные результаты показали, что использование битуминозных пород для приготовления горячего асфальтобетона и битума на их основе возможно, а свойства полученного материала соответствуют действующим стандартам качества. **Вывод.** Установлена зависимость свойств и химического состава материала от месторождения, в котором производили его добычу.

**Ключевые слова:** битуминозные породы, природные битумы, кыры, геоника, асфальтобетон

**Для цитирования:** М. А. Высоцкая, А.В Курлыкина, В.А. Токарев. Использование битуминозных пород и природных битумов с точки зрения геоники. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023; 50(4): 175-183. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-4-175-183

**The use of bituminous rocks and natural bitumens from a geonic point of view**

**M.A. Vysotskaya, A.V. Kurlykina, V.A. Tokarev**

V.G. Shukhov Belgorod State Technological University,  
46 Kostyukova St., Belgorod 308012, Russia

**Abstract. Objective.** The purpose of the work is to study the experience of using bituminous rocks from various deposits for the preparation of hot asphalt concrete or extracting bitumen from rocks from the point of view of geonics. **Method.** The following research methods are used: systematization, description and analysis. The necessary data is formed on the basis of information obtained from the analysis of domestic and foreign articles related to the topic of natural bitumen and practical experience in extracting bitumen from tar sand for the preparation of hot asphalt concrete mixture using bituminous rocks without the use of petroleum bitumen from various fields. **Result.** Various works on the preparation of hot asphalt concrete and bitumen from bituminous rocks are considered. The results obtained showed that the use of bituminous rocks for the preparation of hot asphalt concrete and bitumen based on them is possible, and the properties of the resulting material comply with current quality standards. **Conclusion.** The dependence of the properties and chemical composition of the material on the deposit in which it was mined has been established.

**Keywords:** bituminous rocks, natural bitumens, kiras, geonics, asphalt

**For citation:** M.A. Vysotskaya, A.V. Kurlykina, V.A. Tokarev. The use of bituminous rocks and natural bitumens from a geonic point of view. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2023; 50(4):175-183. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-4-175-183

**Введение.** Трансдисциплинарные исследования – это визитная карточка ведущих научных школ мира. Трансдисциплинарные исследования базируются на широкомасштабном использовании и переносе знаний, закономерностей, познавательных схем из одних дисциплин в другие, с получением эмерджентных свойств, т.е., свойств, которыми не обладают отдельные звенья системы или дисциплины, но они являются следствием эффекта целостности системы [1,2]. Одним из первых трансдисциплинарных направлений является кибернетика – наука об общих законах управления в системах любой природы: биологической, технической, социальной. Основной объект кибернетики – кибернетические системы, рассматриваемые вне зависимости от их материальной природы, способных воспринимать, хранить и перерабатывать информацию и использовать ее для управления и регулирования данными [3]. Направлениями кибернетики являются бионика и геоника.

Бионика помогает человеку справляться со сложными инженерными задачами путем анализа структуры и жизнедеятельности организмов. Геоника более молодое ответвление кибернетики, которое анализирует процессы, происходящие в неорганической среде и на их основе предлагает готовые решения. Направлениями геоники являются: оптимизация системы «человек-материал-среда обитания», архитектурная геоника, освоение и строительство подземных пространств, проблемы развития органического и неорганического мира, разработка алгоритмов и моделей создание и управления объектами неорганического мира, использование энергетики геологических и космических процессов, разработка новых технологий получения минералов и композитов [4], (рис. 1.).



**Рис. 1. Научные направления геоники**

**Fig. 1. Scientific directions of geonics**

**Постановка задачи.** Проблема развития органического и неорганического миров включает в себя задачу по комфортному существованию человека за счет более эффективного использования имеющихся ресурсов [5]. Но при всей важности стоящей задачи и многообразии отраслей, по которым приведены научные исследования, теме геоники применительно к дорожному хозяйству, а именно природным битумам и битуминозным породам уделено не заслуженно мало внимания. Растущий с каждым годом объем потребления битума заставляет человечества искать новые источники сырья, и тут хорошо применима поговорка «Все новое - это хорошо забытое старое».

Природные битумы и битуминозные породы использовались человеком с давних времен. Следы битума на каменном орудии неандертальца говорят о том, что применять битум начали более 40000 лет назад еще во времена Палеолита. Широкое распространение битум получил в Древнем Египте и Месопотамии. В процессе раскопок обнаружено большое количество сооружений, в которых битум выполнял роль вяжущего для соединения плит стен и полов зданий [6]. В качестве гидроизоляции битум применялся еще в начале первого тысячелетия до н.э. при строительстве тоннеля под Евфратом.

В Европе после открытия месторождений битуминозных пород на территории Франции, Швейцарии, Германии, в 1700–1800 г. г. начинается их внедрение в устройстве полов, тротуаров и гидроизоляции [7]. В 1835 г. были уложены первые тротуары в Париже, а спустя год асфальтовая дорога появилась и в Лондоне. К середине 19 века асфальтовые покрытия появляются и в США, первые дороги были построены с использованием импортированного из Европы Сейсельского битуминозного известняка. В конце столетия материал доставлялся в страну с острова Тринидад, где располагается огромное асфальтовое озеро.

В Российской империи первое асфальтовое покрытие тротуаров было осуществлено в 1866 г. в Петербурге, в 1869 г. в г. Кронштадте [8] с использованием ганноверской битуминозной породы, хотя к этому времени было уже открыто несколько месторождений битуминозных пород в России. Первое из них (битуминозные известняки) было открыто в Сызрани в 1724г., а в 1871 г. в этом городе стало функционировать предприятие по изготовлению асфальтовой мастики [7]. В следующем году асфальт стали довольно широко использовать на обычных питерских улицах, площадях и во дворах, и к 1880 году им были покрыты многие улицы в Кронштадте, Москве, Риге, Харькове, Киеве и Одессе [9].

С приобретением нефти статуса одного из важнейших топливных ресурсов, вариантом использования битуминозных песков стало выделение из него той самой нефти. Карл Кларк первым открыл способ выделения битума из битуминозных песков при помощи пара. Однако по сравнению с обычной нефтью, синтетическая нефть из битума является дорогой и сложной в производстве [10]. Самыми богатыми данными ресурсами странами являются Венесуэла и Канада. В Канаде разработка битуминозных песчаников в промышленных масштабах началась в 1927 году путем закачивания горячей воды в песок. Венесуэла начала разработку своих месторождений в 1979 году, но значительных успехов удалось добиться лишь в конце 1990-х годов с появлением более совершенных технологий. Применимость той или иной технологии разработки обуславливается различными факторами: количеством и свойствами залежей, географическим положением месторождений, глубиной залегания продуктивной толщи и т. д.) [11]. На рис. 2 показано расположение месторождений природных битумов по странам.

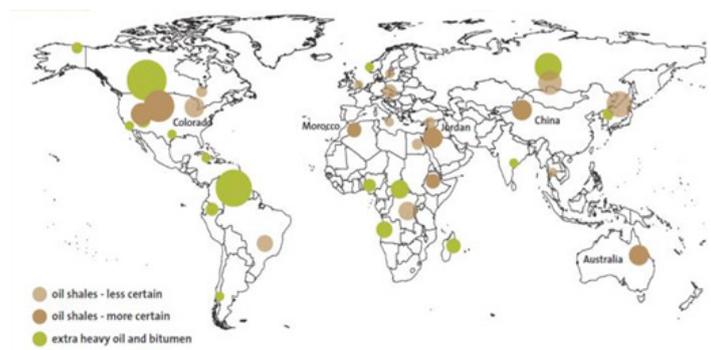


Рис. 2. Месторождение природных битумов [9]

Fig. 2. Natural bitumen deposit [9]

Россия в этом списке находится на третьем месте по запасам битуминозных пород. Суммарные прогнозируемые запасы природных битумов составляют более 30 млрд.т. [12]. Месторождения находятся как в Европейской, так и в Азиатской части страны. Асфальтовые озера расположены даже в Сахалинской области [13]. Основные регионы депозитов битуминозных пород в России: Волго-Уральская, Тимано-Печорская, Северный Кавказ-Мангишлак и Тунгуская. Бассейн Тунгуска является самым большим, однако расположен в очень отдаленной территории на территории Красноярского края, республики Саха и Иркутской области. Наиболее исследуемый из нефтегазовых бассейнов Волго-Уральский, территориально расположенный в Татарстане. Примерные запасы битуминозных песков в нефтегазовой провинции представлены в табл. 1.

**Таблица 1. Запасы битуминозных песков [13]****Table 1. Bituminous sand reserves [13]**

Область месторождений/Field area	Запасы (млн т.) Reserves
Тимано-Печорская/Timano-Pechorskaya	807,9
Волго-Уральская Volgo-Ural	4094,5
Восточно-Сибирская East Siberian	20770 5
Итого/ Total	25672,1

С точки зрения геоники важно понимать для чего могут быть использованы огромные запасы битуминозных песков и природных битумов. При этом не стоит забывать, что их использование должно быть максимально эффективно и приносить максимально возможную пользу человечеству. Понимание того, как извлекается битум из битуминозных пород и соответствует ли полученный материал действующим стандартам, а также свойства приготовленной на основе битуминозного песка асфальтобетонной смеси покажет перспективы использования данных материалов в дорожном строительстве.

**Методы исследования.** Произведена аналитика отечественных и зарубежных статей, связанных с темой природных битумов. Изучен опыт зарубежных ученых по извлечению битума из битуминозного песка для приготовления горячей асфальтобетонной смеси с использованием битуминозных пород без применения нефтяного битума. Рассмотрены исследования, в которых используется материал из различных месторождений, расположенных на значительном расстоянии друг от друга.

**Обсуждение результатов.** Множество научных работ написанных про методы, с помощью которых происходит извлечение из битуминозных пород битума в конечном счете сводятся к одному алгоритму действий [14]:

- битумоносная порода извлекается на поверхность, природный битум из породы экстрагируют растворителем, извлекают горячей водой с добавками эмульгирующих систем, пара и т.п.;
- природный битум добывают в шахте из скважин без подъема битуминозной породы на поверхность;
- природный битум добывается из скважины после предварительного разогрева пласта для увеличения подвижности углеводородов за счет закачки горячей воды, пара, частичного сжигания в пласте природного битума.

Использование кондиционных реагентов и горячей воды при извлечении из битуминозных пород природного битума предлагается в патентах [15, 16]. В этом случае заменой каустической соды служат кондиционные реагенты. Преимуществом данных методов является уменьшение образования шлама. Для получения битума в патенте [17] предлагается смешать чистый крупнозернистый песок и воду с битуминозным песком. Это необходимо для отделения битума от породы. Поток воды при умеренном перемешивании мелкозернистый песок и природный битум вымываются из смеси. Суспензия битума и мелкодисперсного песка направляется на пенную флотацию для отделения песка. Применение для извлечения битума из битуминозных пород шнековой мойки с мешалкой описано в патенте [18]. При смешивании с горячей водой и паром битуминозного песка в агрегате выделяются три слоя: суспензия глина–песок-вода природный битум и порода. Далее происходит разделение этих слоев, и на выходе получаем уже отделенный от породы природный битум. В способе [19] описано получение битума путем водной обработке битуминозного песка. При обработке битуминозной породы водой получается пена, в состав которой входит вода, природный битум и песок. Далее из пены путем пиролиза получают природный битум. На тему применения битуминозных пород и природных битумов в дорожном строительстве существуют различные исследования, проводимые в разных странах. Так, например, в Казахстане из битуминозных песков месторождения Мунайли-Мола извлекали битум способом экстракции [20]. В качестве растворителя использовали смесь гексана, толуола, этанола и бензола (соотношение этанол: бензол было равно 1:4). Экстракцию проводили в аппарате Сокслета до прекращения

окрашивания растворителем. Результат эксперимента показал, что извлеченный битум по содержанию в нем углерода, водорода, азота, серы и кислорода практически соответствует БНД 60/90. Отличительной особенностью природного битума является практически одинаковое содержание углерода (между 84 и 85), водорода (11-12) и меньшее содержание серы, азота. Данные по содержанию веществ приведены в табл. 2. Разницей между извлеченным природным битумом и БНД 60/90 является более низкое содержание в природном битуме серы и азота, при этом содержание углерода и водорода находятся примерно на одном уровне.

**Таблица 2. Сравнение полученного методом экстракции битума из месторождения Мунайли-Мола с БНД 60/90 [20]**

**Table 2. Comparison of bitumen obtained by extraction from the Munaili-Mola deposit with BND 60/90 [20]**

Тип битума Bitumen type	Содержание.мас.% Contents.mas				
	С	Н	S	N	О
Битум (гексан)	84.36	12.16	1.294	0.29	1.814
Битум (толуол)	85.00	12.34	1.010	0.30	0.15
Битум (этанол и бензол)	84.69	11.39	1.292	0.38	2.118
БНД 60/90	84.91	11.01	3.050	0.52	0.343

Были приготовлены образцы горячего асфальтобетона с добавлением битуминозного песка из месторождения Мунайли-Мола. В эти образцы не добавлялся нефтяной битум, а вяжущим являлся природный битум содержащийся в битуминозных песках. Полученные результаты представлены в табл. 3, на основании которых можно сделать вывод, что горячая асфальтобетонная смесь с добавлением битуминозных песков вполне соответствует действующим стандартам качества.

**Таблица 3. Свойства горячего асфальтобетона из битуминозных песков месторождения Мунайли-Мола [20]**

**Table 3. Properties of hot asphalt concrete from bituminous sands of the Munaili-Mola deposit [20]**

Характеристика/ Characteristic	Асфальтобетонная смесь с битуминозными песками, %		
	Asphalt concrete mixture with tar sands		
	28	47	60
Средняя плотность, г/см <sup>3</sup> Average density	2,29	2,30	2,22
Водонасыщенность, % Water saturation	6,1	2,4	2,6
Предел прочности при сжатии, МПа, при 20°C/ Ultimate compressive strength	8,7	4,6	4,2
Предел прочности при сжатии, МПа, при 20°C после водонасыщения /Ultimate compressive strength, MPa, at 20°C after water saturation	6,5	4,7	4,8
Предел прочности при сжатии, МПа, при 50 °C Ultimate compressive strength	2,1	1,1	0,6
Предел прочности при сжатии, МПа, при 0°C Ultimate compressive strength	14,9	13,0	5,1
Водонепроницаемость/ Waterproof	1,0	0,75	0,64
Адгезия связующего к минеральной части смеси/ Adhesion of binder to mineral parts of the mixture	Выдерживает/ Withstands	Выдерживает/ Withstands	Выдерживает/ Withstands

В Монголии было проведено исследование на пригодность использования битуминозного песка из месторождения Баян-Эрхэт в дорожном строительстве [21]. Добыча природного битума из битуминозных песков происходила методом экстракции, а в качестве растворителя использовался толуол. Элементный и групповой химический составы природного битума сравнивали с составом вязкого нефтяного дорожного битума марки БНД 60/90 из нефти западносибирских месторождений. Отличительной особенностью природного битума является весьма высокое содержание водорода (16 мас. %), кислорода и азота (13,7 мас. %), пониженное содержание углерода (69,6 мас. %) и серы (0,7 мас. %). Свойства битума полученного из битуминозного песка месторождения Баян-Эрхэт приведены в табл. 4. Как следует из данных табл. 4, природный битум пробы № 1 по комплексу стандартных свойств приближается к требованиям, предъявляемым к марке

БНД 60/90, за исключением несколько более высокого показателя температуры хрупкости по Фраасу.

**Таблица 4. Свойства битума из месторождения Баян-Эрхэт [21]**

**Table 4. Properties of bitumen from the Bayan-Erkhet deposit [21]**

Характеристика/ Characteristic	Природный битум/ Natural bitumen	
	Образец №1	Образец №2
Глубина проникания иглы, 0,1 мм/ Needle penetration depth	64	62
При 25 °С	24	27
При 0 °С	56	66
Растяжимость при 25°С, см/ Extensibility	49	54
Температура размягчения, °С/ Softening temperature	-13,5	-18
Температура хрупкости, °С/ Brittleness temperature	-0,9	+0,3
Индекс пенетрации/ Penetration index	–	480
Вязкость динамическая при 60 °С, Па·с/ Dynamic viscosity	отсутствует/ absent	отсутствует/ absent
Содержание водорастворимых соединений, мас. %/ Content of water-soluble compounds	62,5	72
Интервал работоспособности, °С Service interval	1,11	1,09
Коэффициент структуры $K_{стр} = (T_p - T_{хр}) / D_{25}$ Structure coefficient	64	62
<b>После прогрева при 163°С в течение 5ч/ After heating at 163°С for 5 hours</b>		
Изменение температуры размягчения, °С Change in softening temperature	2	3
Изменение массы, % Change in mass	0,21	0,45
Вязкость динамическая при 60°С, Па·с Dynamic viscosity	–	956

Природный битум пробы № 2 по сравнению с пробой № 1 имеет более высокие показатели деформативности, теплоустойчивости и трещиностойкости, широкий интервал работоспособности. Такой битум по всем показателям свойств соответствует марке БНД60/90. Также был приготовлен асфальтобетон из битуминозных песков месторождения Баян-Эрхэт. Свойства полученных асфальтобетонных смеси представлены в табл. 5.

**Таблица 5. Свойства горячего асфальтобетона из битуминозных песков месторождения Баян-Эрхэт [21]**

**Table 5. Properties of hot asphalt concrete from bituminous sands of the Bayan-Erkhet deposit [21]**

Характеристика/ Characteristic	Тип асфальтобетона/ Type of asphalt concrete	
	Б	Д
Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup> Average density	2370	2340
Остаточная пористость, % Residual porosity	3,3	2,51
Водонасыщение, % Water saturation	1,86	2,21
Предел прочности при сжатии, МПа, при температуре: Compressive strength, МПа, at temperature:		
50°С	1,6	1,3
20°С	5,1	3,5
0°С	13,5	10,5
Предел прочности при растяжении при расколе, МПа, при 0°С / Tensile strength at splitting	5,2	4,72
Коэффициент водостойкости/ Water resistance coefficient	1	0,98
Коэффициент длительной водостойкости Long-term water resistance factor	0,89	0,81

Подбор составов горячих плотных асфальтобетонных смесей проводили с учетом содержания в битуминозных песках природного вязкого битума и зернового состава песка из битуминозных песков. Битуминозный песок с повышенным содержанием битума (14,81 мас. %) использовали для горячей щебеночной асфальтобетонной смеси типа Б, битуминозный песок (содержание битума 9,5 мас. %) для горячей песчаной асфальтобетонной смеси типа Д. Были установлены следующие составы асфальтобетонных смесей: тип Б, мас. %: щебень гранитный фракции 5–20 - 44 %; битуминозный песок (содержание битума 14,81%) – 36 %; песок природный фракций 0,315–0,63 мм и 0,16–0,315 мм – 12 %; активированный минеральный порошок – 8; тип Д, мас. %: битуминозный песок – 70 %; песок природный

фракций 0,315–0,63 и 0,16–0,315 мм – 18 %; активированный минеральный порошок – 12 %. По полученным результатам можно сделать вывод что горячая асфальтобетонная смесь с добавлением битуминозных песков из месторождения Баян-Эрхэт вполне соответствует действующим стандартам качества.

В самой богатой залежами битуминозного песка стране мира Канаде также проводились исследования природного битума полученного из этих песков [22]. Битуминозный песок для эксперимента добывался из месторождения Атабаска. В качестве растворителя в процессе экстракции был выбран пентан. Далее, полученный химический состав природного битума сравнивали с известными мировыми марками. Сравнение представлено в табл.6. Анализ табл.6 демонстрирует, что битум полученный из битуминозных песков Атабаски довольно богат микроэлементами, такими как ванадий и никель, которые, как известно, являются токсичными металлами. Поскольку эти металлы могут отравить катализатор, используемый в процессах повышения качества, таких как гидрокрекинг, желателно удалить их перед процессом повышения качества. Кроме того, содержание серы в битуме Атабаска выше, чем в других представленных битумах.

**Таблица 6. Сравнение битума полученного из месторождения Атабаски [22]**

**Table 6. Comparison of bitumen obtained from the Athabasca deposit [22]**

Содержание/ Content	Daqing	Shengli	Saudi medium	Iranian heavy	Oman	Athabasca bitumen
Плотность при 20°C (г/см) Density	0,9392	0,9724	1,0258	1,0222	0,9637	0,8973
H/C (атомный)	1,79	1,58	1,51	1,44	1,60	1,50
S (мас.%)	0,15	3,01	4,79	3,11	1,68	4,78
N (мас.%)	0,44	0,95	0,53	0,62	0,45	1,63
Ni (мг/л)	7,60	55,70	36,70	90,00	18,00	68,50
V (мг/л)	0,1	3,3	147,4	205,8	21,8	174,00
Асфальтены (мас.%) Asphaltenes	0,00	2,20	9,30	10,80	2,00	15,59
Мальтен (мас.%) Malten	0,00	97,8	89,60	89,10	98,10	84,41
Насыщенные ароматические соединения (мас.%) /Saturated aromatic compounds	74,6	46,7	55,90	59,20	66,90	67,97
Смола (мас.%) Resin	25,4	51,1	33,7	29,9	31,20	16,44

**Вывод.** Сегодня основная масса дорожных битумов производится из нефти. Это достаточно трудоемкий процесс, сопровождающийся большим количеством вредных выбросов. Одним из преимуществ нефтяного битума над природным является возможность его производства на достаточном удалении от нефтяных месторождений, но при текущем темпе развития логистики можно с уверенностью сказать, что скоро это преимущество нивелируется. Благодаря проведенным исследованиям можно сказать, что полученный из битуминозных пород асфальтобетон и извлеченный битум по своим свойствам вполне соответствуют необходимым стандартам качества. Однако также видна зависимость свойств и химического состава материала от месторождения в котором производили его добычу.

Направление по исследованию применения битуминозных пород в дорожном строительстве является актуальным. Динамично развивающаяся и требующая все новых и новых ресурсов промышленность и напряженная мировая ситуация обязывают искать новые эффективные решения по применению находящихся у нас ресурсов.

Использование битуминозных пород для приготовления горячего асфальтобетона, а также извлечение из них битума может стать одним из качественно новых решений по их применению в наше время. Особенно это актуально для России которой не грозит дефицит нефти, а вот потребность в качественных материалах для дорожного строительства будет существовать всегда, исходя из географических размеров страны.

#### Библиографический список:

1. Бряник Н. В. и др. История и философия науки: Философия науки: хрестоматия. – 2021.
2. Лесовик В.С. К проблеме научного сотрудничества при изучении пород вскрыши месторождений КМА

- // Творческое содружество научно-исследовательских, проектно-конструкторских организаций, Вузов и предприятий в распространении и внедрении научных достижений. Тез.докладов. Материалы предстоящей научно-технической конференции; Белгород, 1977. – с. 16–17.
3. Мухсинова Л. Исследование систем управления. – Litres, 2022.
  4. Геоника (геомиметика). Примеры реализации в строительном материаловедении: монография / В.С. Лесовик. – 2-е изд., доп. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2016. – 287 с.
  5. Геоника (геомиметика) и поиск оптимальных решений в строительном материаловедении/ В.С. Лесовик, А.А. Шеремет, И.Л. Чулкова, А.Э. Журавлева. – DOI <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-1-120-134> // Вестник СибАДИ. – 2021. – Т. 18, № 1(77). – С. 120–134.
  6. Губина, М.А. Способы добычи тяжелых нефтей и природных битумов / М.А. Губина, Н.П. Коновалов // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2012. № 6(65). – С. 105-109.
  7. Руденская И. М., Руденский А. В. Органические вяжущие для дорожного строительства. — М.: Транспорт, 1984. — 229с.
  8. Мукаев И. С. Исторические аспекты использования нефтяных битумов в производстве асфальтобетонных смесей: На примере дорожно-строительных предприятий г. Уфы: автореф. дисс.... канд. техн. наук: 07.00.10. /Уфа. 2000.-24с.
  9. Становление и развитие битумного производства / Н. А. Страхова, А. Н. Маслак, Н. А. Белова [и др.]. — Текст : непосредственный // Молодой ученый. — 2017. — № 14 (148). — С. 128-132. — URL: <https://moluch.ru/archive/148/41491/> (дата обращения: 19.01.2023).
  10. Parviz M. Rahimi and Thomas Gentzis. The chemistry of bitumen and heavy oil processing. National Centre for Upgrading Technology, Oil Patch Drive, Suite A202, Devon, Alberta, Canada T9G 1A8. P.149-186.
  11. Non-traditional Oils: Analysis of Regional Distribution and Reserves of Heavy Oil and Natural Bitumen / T. Yarboboev, Sh. Sultanov, F. Aminov, D. Navotova. Bulletin of Science and Practice. 2020. – Vol. 6. – No 7. – P. 226-234. – DOI 10.33619/2414-2948/56/23.
  12. Мамахатов Т.М. Битуминозные пески в Сибири и их значение для топливно-энергетического комплекса стран мира// Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2014. – Т. 3. – № 1. – С. 116-120.
  13. Ганиева Т., Половняк В. Высоковязкие нефти, природные битумы и битумоносные породы. Litres, 2022.
  14. Мингареев, Р.Ш. Эксплуатация месторождений битумов и горючих сланцев / Р.Ш. Мингареев, И.И. Тучков. – М. Недра, 1980. – 572 с.
  15. Пат. US 5626743, МПК7 C 10 G 1/04, C 10 G 1/00. Tar sands extraction process / Humphreys Reginald D; заявитель и патентообладатель Geopetrol Equipment Ltd. – № US 19950467667; заявл. 06.06.1995; опубл. 06.05 1997.
  16. Пат. US 2002104799, МПК7 B 01 D 17/00; B 03 B 9/00; B 03 D 1/02, C 10 G 1/04, C 10 G 1/00. Tar sands extraction process / Humphreys Reginald D; заявитель и патентообладатель Geosol Technologies Inc. – № US 200110985329; заявл. 01.11.2001; опубл. 08.08 2002.
  17. Пат. US 5186820, МПК7 B 03 B 1/00; B 03 B 9/02; C 10 G 1/04, B 03 B 1/00, B 03 B 9/00, C 10 G 1/00. Process for separating bitumen from tar sands / Shultz Clifford W; Irvin G Daniel; заявитель и патентообладатель Univ Alabama / – № US 19910802186 19911204; заявл. 04.12.1991; опубл. 16.02 1993.
  18. Пат. CA 2165252, МПК7 C 10 G 1/04, C 10 G 1/00. Method and apparatus for removing bituminous oil sands without solvent / Rendall John S., Lane Stephen J; заявитель и патентообладатель Solv Ex Corp. – № CA19952165252 19951214; заявл. 14.12.1995; опубл. 16.06.1996.
  19. Пат. CA 2053016, МПК7 C 10 G 1/04, C 10 G 1/00. Recovery of oil from tar sands / Green Robert C; Stundz Gordon F; Koveal Russel J JR; заявитель и патентообладатель Exxon Research Engineering Co. – № CA 19912053016 19911008; заявл. 08.10.1991; опубл. 02.05. 1992.
  20. Tileuberdi E., Ongarbayev Y., Behrendt F., Schneider I., Imanbayev Y., Tuleutayev B., Mansurov Z. (2012). Possibilities of preparation of asphalt concrete by oil sands of Kazakhstan. Chemical Bulletin of Kazakh National University, 68 (4), 9-13.
  21. Галдина В.Д., Кривонос О.И., Плаксин Г.В., Жаргалсайхан Н. Битуминозные пески Монголии в дорожном строительстве Строительные материалы. 2010. №2. С.27-29.
  22. Yoon S., Bhatt S.D., Lee W. et al. Separation and characterization of bitumen from Athabasca oil sand // Korean J. Chem. Eng. — 2009. — № 26 (1). — P. 64-71.

#### References

1. Bryanik N.V. et al. History and philosophy of science: Philosophy of science: a reader. – 2021. (In Russ )
2. Lesovik, V.S. On the problem of scientific cooperation in the study of overburden rocks of KMA deposits / V.S. Lesovik. Creative community of research, design and engineering organizations, universities and enterprises in the dissemination and implementation of scientific achievements. Abstracts. Materials of the upcoming scientific and technical conference; Belgorod, 1977; 16–17. (In Russ )
3. Mukhsinova L. Research of control systems. – Litres, 2022. (In Russ )
4. Geonics (geomimetics). Examples of implementation in construction materials science: monograph / V.S. Lesovik. – 2nd ed., add. – Belgorod: BSTU Publishing House, 2016; 287. (In Russ )

5. Geonics (geomimetics) and the search for optimal solutions in construction materials science / V.S. Lesovik, A.A. Sheremet, I.L. Chulkova, A.E. Zhuravleva. DOI <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-1-120-134>. *SibADI Bulletin*. 2021;18(1(77)):120–134. (In Russ )
6. Gubina, M.A. Methods for extracting heavy oils and natural bitumens. M.A. Gubina, N.P. Kononov. *Bulletin of Irkutsk State Technical University*. 2012; 6(65):105-109. (In Russ )
7. Rudenskaya I.M., Rudensky A.V. Organic binders for road construction. M.:Transport, 1984;229.(In Russ )
8. Mukaev I.S. Historical aspects of the use of petroleum bitumen in the production of asphalt concrete mixtures: On the example of road construction enterprises in Ufa: abstract of thesis. diss....cand. tech. Sciences: 07.00.10. /Ufa. 2000;24(In Russ )
9. Formation and development of bitumen production / N. A. Strakhova, A. N. Maslak, N. A. Belova [etc.]. Text: immediate. *Young scientist*. 2017;14(148):28-132. URL: <https://moluch.ru/archive/148/41491/> (access date: 01/19/2023).(In Russ )
10. Parviz M. Rahimi and Thomas Gentzis. The chemistry of bitumen and heavy oil processing. *National Center for Upgrading Technology, Oil Patch Drive, Suite A202, Devon, - Alberta, Canada T9G 1A8*: 149-186.
11. Non-traditional Oils: Analysis of Regional Distribution and Reserves of Heavy Oil and Natural Bitumen / T. Yarboboev, Sh. Sultanov, F. Aminov, D. Navotova. *Bulletin of Science and Practice*. 2020; 6(7): 226-234. – DOI 10.33619/2414-2948/56/23 .(In Russ )
12. Mamakhatov, T.M. Tar sands in Siberia and their significance for the fuel and energy complex of the countries of the world. *Interexpo Geo-Siberia*. 2014; 3(1):116-120. .(In Russ )
13. Ganieva T., Polovnyak V. High-viscosity oils, natural bitumens and bitumen-bearing rocks. – Litres, 2022.
14. Mingareev, R.Sh. Exploitation of bitumen and oil shale deposits / R.Sh. Mingareev, I.I. Tuchkov. – M. Nedra, 1980; 572.(In Russ )
15. Pat. US 5626743, MPK7 C 10 G 1/04, C 10 G 1/00. Tar sands extraction process. Humphreys Reginald D; applicant and patent holder Geopetrol Equipment Ltd. No. US 19950467667; application 06/06/1995; publ. 05/06/1997.
16. Pat. US 2002104799, IPC7 B 01 D 17/00; At 03 At 9/00; B 03 D 1/02, C 10 G 1/04, C 10 G 1/00. Tar sands extraction process / Humphreys Reginald D; applicant and patent holder Geosol Technologies Inc. –No. US 200110985329; application 01.11.2001; publ. 08.08.2002.
17. Pat. US 5186820, MPK7 V 03 V 1/00; B 03 B 9/02; C 10 G 1/04, B 03 B 1/00, B 03 B 9/00, C 10 G 1/00. Process for separating bitumen from tar sands / Shultz Clifford W; Irvin G Daniel; applicant and patent holder Univ Alabama / - No. US 19910802186 19911204; application 04.12.1991; publ. 02/16/1993.
18. Pat. CA 2165252, MPK7 C 10 G 1/04, C 10 G 1/00. Method and apparatus for removing bituminous oil sands without solvent / Rendall John S., Lane Stephen J; applicant and patentee Solv Ex Corp. – No. SA19952165252 19951214; application 12/14/1995; publ. 06/16/1996.
19. Pat. SA 2053016, MPK7 C 10 G 1/04, C 10 G 1/00. Recovery of oil from tar sands. Green Robert C; Stundz Gordon F; Koveal Russell J JR; applicant and patent holder Exxon Research Engineering Co. – No. SA 19912053016 19911008; application 08.10.1991; publ. 02.05. 1992.
20. Tileuberdi, E., Ongarbayev, Y., Behrendt, F., Schneider, I., Imanbayev, Y., Tuleutayev, B., Mansurov, Z. (2012). Possibilities of preparation asphalt concrete by oil sands of Kazakhstan. *Chemical Bulletin of Kazakh National University*, 68 (4), 9-13.
21. Galdina V.D., Krivonos O.I., Plaksin G.V., Zhargalsaikhan N. Tar sands of Mongolia in road construction Construction materials. 2010; 2:27-29. (In Russ )
22. Yoon S., Bhatt S.D., Lee W. et al. Separation and characterization of bitumen from Athabasca oil sand. *Korean J. Chem. Eng*.2009;26 (1): 64-71.

**Сведения об авторах:**

Высоцкая Марина Алексеевна, кандидат технических наук, доцент кафедры автомобильных и железных дорог, [roruri@rambler.ru](mailto:roruri@rambler.ru)

Курлыкина Анастасия Владимировна, аспирант; [anastas.k8@yandex.ru](mailto:anastas.k8@yandex.ru)

Токарев Владимир Алексеевич, аспирант; [tokareva161@mail.ru](mailto:tokareva161@mail.ru)

**Information about authors:**

Marina A. Vysotskaya, Cand. Sci. (Eng), Assoc. Prof., Department of Roads and Railways, [roruri@rambler.ru](mailto:roruri@rambler.ru)

Anastasia V. Kurlykina, Graduate Student; [anastas.k8@yandex.ru](mailto:anastas.k8@yandex.ru)

Vladimir A. Tokarev, Graduate Student; [tokareva161@mail](mailto:tokareva161@mail.ru)

**Конфликт интересов/Conflict of interest.**

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

Поступила в редакцию/ Received 11.10.2023.

Одобрена после рецензирования / Revised 30.10.2023.

Принята в печать /Accepted for publication 30.10.2023.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА  
BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 624.04

DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-4-184-190



Оригинальная статья /Original article

**Ползучесть замкнутого цилиндрического резервуара  
при гидростатическом давлении**

**М.Ш. Гатиев<sup>1</sup>, Б.М. Языев<sup>2</sup>, Ю.П. Иванова<sup>3</sup>, С.В. Клюев<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>Комплексный научно-исследовательский институт им. Х.И. Ибрагимова РАН,  
<sup>1</sup>364051, г. Грозный, В. Алиева (Старопромысловское шоссе), 21, Россия,

<sup>2</sup>Донской государственный технический университет,  
<sup>2</sup>344003, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, Россия,

<sup>3</sup>Волгоградский государственный технический университет,  
<sup>3</sup>400005, Волгоград, пр. им. Ленина, д.28, Россия,

<sup>4</sup>Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова,  
<sup>4</sup>308012, г. Белгород, ул. Костюкова 46, Россия

**Резюме. Цель.** При построении разрешающих соотношений теории оболочек предполагается справедливость основных допущений о материале рассматриваемой конструкции, который считается однородным, изотропным и вязкоупругим, т.е. подчиняющимся закону Максвелла-Гуревича. Исследованию подлежит полимерная цилиндрическая оболочка, жестко защемленная у основания, подверженная внутреннему гидростатическому давлению. **Метод.** Задача сводится к неоднородному дифференциальному уравнению четвертой степени относительно перемещения срединной поверхности  $w$  вдоль оси  $z$ . Так как в замкнутом виде представление решения данного уравнения крайне затруднено, то поиск его представлен численно, в частности, методом сеток. Составляющие деформации ползучести  $\epsilon_x^*$ ,  $\epsilon_\theta^*$ ,  $\gamma_{x\theta}^*$  определялись как линейная аппроксимация скорости методом Рунге-Кутты. **Результат.** В процессе расчета оболочки по моментной теории, было обнаружено, что в результате ползучести оболочки тангенциальные напряжения выросли более чем на 12 процентов. **Вывод.** Предложенная методика позволяет моделировать изменение механических свойств оболочки (например, косвенная неоднородность) вызванной воздействием физических полей.

**Ключевые слова:** замкнутая цилиндрическая оболочка, гидростатическое давление, метод сеток, разрешающее уравнение, метод Рунге-Кутты

**Для цитирования:** М.Ш. Гатиев, Б.М. Языев, Ю.П. Иванова, С.В. Клюев. Ползучесть замкнутого цилиндрического резервуара при гидростатическом давлении. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023; 50(4): 184-190. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-4-184-190

**Creep of a closed cylindrical tank at hydrostatic pressure**

**M.Sh. Gatiev<sup>1</sup>, B.M. Yazyev<sup>2</sup>, Yu.P. Ivanova<sup>3</sup>, S.V. Klyuev<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>Kh.I. Ibragimov Complex Research Institute of the Russian Academy of Sciences,

<sup>1</sup>21 V. Alieva (Staropromyslovskoe highway), Grozny 364051, Russia,

<sup>2</sup>Don State Technical University,

<sup>2</sup> Gagarin Square, Rostov-on-Don 344003, Russia,

<sup>3</sup>Volgograd State Technical University,

<sup>3</sup> 28 Lenina Ave., Volgograd 400005, Russia,

<sup>4</sup> V.G. Shukhova Belgorod State Technological University,

<sup>4</sup> 46 Kostyukova St., Belgorod 308012, Russia

**Abstract. Objective.** When constructing the resolving relations of the theory of shells, the validity of the basic assumptions about the material of the structure under consideration is assumed, which is considered homogeneous, isotropic and viscoelastic, i.e. obeying the Maxwell-Gurevich law. The subject to study is a polymer cylindrical shell, rigidly clamped at the base and subject to internal hydrostatic pressure. **Method.** The problem is reduced to an inhomogeneous differential equation of the fourth degree with respect to the displacement of the middle surface  $w$  along the  $z$  axis. Since the closed form representation of the solution to this equation is extremely difficult, the search for it is presented numerically, in particular, using the grid method. The creep strain components  $\epsilon_x^*$ ,  $\epsilon_\theta^*$ ,  $\gamma_{x\theta}$  were determined as a linear approximation of the velocity by the Runge-Kutta method. **Result.** In the process of calculating the shell using moment theory, it was found that as a result of shell creep, tangential stresses increased by more than 12 percent. **Conclusion.** The proposed technique makes it possible to simulate changes in the mechanical properties of the shell (for example, indirect heterogeneity) caused by the influence of physical fields.

**Key words:** closed cylindrical shell, hydrostatic pressure, grid method, resolving equation, Runge-Kutta method

**For citation:** M.Sh. Gatiev, B.M. Yazyev, Yu.P. Ivanova, S.V. Klyuev. Creep of a closed cylindrical tank at hydrostatic pressure. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2023; 50(4): 184-190. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-4-184-190

**Введение.** Оболочечные конструкции в виде полых тонкостенных цилиндров из стали, полимеров, керамики используются в различных отраслях народного хозяйства. При этом отметим, что они могут подвергаться длительным механическим нагрузкам, которые как следствие вызывают деформации ползучести или если это полимеры – высокоэластические деформации. Поэтому расчеты оболочек с учетом вышеуказанных явлений необходимо вести с учетом возможности развития деформации ползучести. Если речь идет о конструкций или их элементов из композита, то температурные воздействия приводят к косвенной неоднородности и вызывает высокоэластические деформации.

Очевидно, что использование конструкционных полимеров это будущее, но есть основной недостаток – это ограничение по температуре и реология связующего. Поэтому попытки расчетов таких полимерных конструкций с учетом ползучести интересны и с точки зрения прогнозирования остаточного ресурса рассматриваемой конструкции.

**Постановка задачи.** На (рис.1) приведена расчетная схема рассматриваемой задачи. Граничные условия можно описать следующим образом: верхний торец свободен от нагрузок (момент и поперечная сила равны нулю), а нижний торец зашпелен (перемещения срединной поверхности и угол поворота равны нулю).

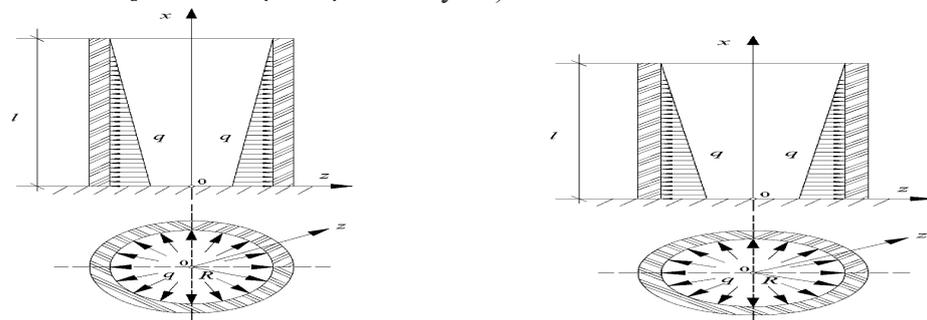


Рис.1. Расчетная схема замкнутой цилиндрической оболочки  
Fig.1. Design diagram of a closed cylindrical shell

Задача осесимметричная и соответственно не зависят от полярного угла  $\theta$  и как следствие, все производные по данному параметру в статических, геометрических и физических уравнениях равны нулю. Сдвигающие усилия  $S$  и крутящий момент  $H$  в оболочке также обращаются в нуль. Гидростатическое давление на стенку резервуара меняется по линейному закону:

$$z_v = \gamma(l - z);$$

здесь  $\gamma$  – удельный вес жидкости,  $l$  – высота резервуара.

**Методы исследования.** Для вывода разрешающего уравнения приведем основные соотношения:

1. Статические уравнения [2]

$$\frac{1}{R} \cdot \begin{Bmatrix} R \frac{\partial}{\partial x} & 0 & \frac{\partial}{\partial \theta} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial \theta} & R \frac{\partial}{\partial x} & 0 & \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial \theta} & \frac{\partial}{\partial x} \\ 0 & -1 & 0 & R \frac{\partial^2}{\partial x^2} & \frac{1}{R} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} & 2 \frac{\partial^2}{\partial x \partial \theta} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} N_x \\ N_\theta \\ S \\ M_x \\ M_\theta \\ H \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} X_v \\ Y_v \\ Z_v \end{Bmatrix} = 0 \quad (1)$$

Здесь  $N_x, N_\theta$  и  $S$  – продольные и сдвигающая силы соответственно;  $M_x, M_\theta$  и  $H$  – изгибающие и крутящий моменты соответственно.  $X_v, Y_v, Z_v$  – компоненты поверхностной нагрузки.

Геометрические соотношения Коши (связь деформаций и перемещений) можно представить, как [2]:

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \frac{\partial u_0}{\partial x} - z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \\ \varepsilon_y = \left( \frac{1}{R} \frac{\partial v_0}{\partial \theta} + \frac{w}{R} \right) + \frac{z}{R^2} \left( \frac{\partial v_0}{\partial \theta} - \frac{\partial^2 w}{\partial \theta^2} \right) \\ \gamma_{x\theta} = \left( \frac{1}{R} \frac{\partial u_0}{\partial \theta} + \frac{\partial v_0}{\partial x} \right) + \frac{z}{R} \left( \frac{\partial v_0}{\partial x} - 2 \frac{\partial^2 w}{\partial \theta \partial x} \right) \end{cases} \quad (2)$$

Перемещения с индексом «0» - деформации точек срединной поверхности, а деформации  $w$  связаны с изгибом и кручением срединной поверхности в соответствующих направлениях.

Что касается физических соотношений, то с учетом вынужденных деформаций они имеют вид [3-5]:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_\theta \\ \gamma_{x\theta} \end{Bmatrix} = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 & -\nu & 0 \\ -\nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2(1+\nu) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_\theta \\ \tau_{x\theta} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^* \\ \varepsilon_\theta^* \\ \gamma_{x\theta}^* \end{Bmatrix} \quad (3)$$

здесь  $\varepsilon_x^*, \varepsilon_\theta^*, \gamma_{x\theta}^*$  – деформации ползучести;

Напряжения через деформации запишем так:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_\theta \\ \tau_{x\theta} \end{Bmatrix} = \frac{E}{1-\nu^2} \left( \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{(1-\nu)}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_\theta^0 \\ \gamma_{x\theta}^0 \end{Bmatrix} + z \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \chi_x \\ \chi_\theta \\ \chi_{x\theta} \end{Bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^* \\ \varepsilon_\theta^* \\ \gamma_{x\theta}^* \end{Bmatrix} \right) \quad (4)$$

Здесь изменения кривизн:

$$\begin{Bmatrix} \chi_x \\ \chi_\theta \\ \chi_{x\theta} \end{Bmatrix} = \frac{1}{R^2} \begin{bmatrix} -R^2 \frac{\partial^2}{\partial x^2} & 0 \\ -\frac{\partial^2}{\partial \theta^2} & \frac{\partial}{\partial \theta} \\ -\frac{\partial^2}{\partial x \partial \theta} & \frac{R}{2} \frac{\partial}{\partial \theta} \end{bmatrix} \{w \quad v_0\};$$

Продольные и перерезывающие усилия представляют собой:

$$\begin{pmatrix} N_x \\ N_\theta \\ S \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_x dz \\ \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_\theta dz \\ \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \tau_{x\theta} dz \end{pmatrix} = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{(1-\nu)}{2} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_\theta^0 \\ \gamma_{x\theta}^0 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} N_x^* \\ N_\theta^* \\ S^* \end{pmatrix}; \quad (5)$$

где

$$\begin{pmatrix} N_x^* \\ N_\theta^* \\ S^* \end{pmatrix} = \frac{E}{1-\nu^2} \left\{ \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{(1-\nu)}{2} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_x^* \\ \varepsilon_\theta^* \\ \gamma_{x\theta}^* \end{pmatrix} dz \right\};$$

Что касается крутящего и изгибающего момента, то здесь они представлены как:

$$\begin{pmatrix} M_x \\ M_\theta \\ H \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_x dz \\ \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_\theta dz \\ \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \tau_{x\theta} dz \end{pmatrix} = D \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & (1-\nu) \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \chi_x \\ \chi_\theta \\ \chi_{x\theta} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} M_x^* \\ M_\theta^* \\ H^* \end{pmatrix} \quad (6)$$

Здесь  $D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$  – цилиндрическая жесткость.

$$\begin{pmatrix} M_x^* \\ M_\theta^* \\ H^* \end{pmatrix} = \frac{E}{1-\nu^2} \left\{ \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{(1-\nu)}{2} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_x^* \\ \varepsilon_\theta^* \\ \gamma_{x\theta}^* \end{pmatrix} z dz \right\};$$

**Обсуждение результатов.** Рассматривая осесимметричную постановку задачи, все уравнения становятся более простыми (сдвигающее усилие и крутящий момент обращаются в нуль), в частности, из статических уравнений останутся:

$$\begin{cases} \frac{\partial N_x}{\partial x} = 0; \\ \frac{\partial^2 M_x}{\partial x^2} - \frac{N_\theta}{R} + q = 0 \end{cases} \quad (7)$$

Продольные силы и изгибающий момент будут иметь вид:

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_\theta \\ M_x \end{Bmatrix} = \frac{Eh}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} \frac{d}{dx} & \frac{\nu}{R} \\ \nu \frac{d}{dx} & \frac{1}{R} \\ 0 & \frac{h^2}{12} \frac{d^2}{dx^2} \end{bmatrix} \{u_0 \quad w\} - \begin{Bmatrix} N_x^* \\ N_\theta^* \\ M_x^* \end{Bmatrix}; \quad (8)$$

Первое слагаемое из выражения (8) выразим как:

$$\frac{du_0}{dx} = -\frac{\nu w}{R} + \frac{(1-\nu^2)}{Eh} N_x^* \quad (9)$$

Используя из (8) второе соотношение, получим:

$$N_\theta = \frac{Ehw}{R} + \nu N_x^* - N_\theta^* \quad (10)$$

И окончательно, поставив третье уравнение (8) и (10) во второе уравнение (7) получим основное дифференциальное уравнение IV порядка:

$$\frac{d^4 w}{dx^4} + \frac{Ehw}{DR^2} = \frac{1}{D} \left[ q - \frac{d^2 M_x^*}{dx^2} + \frac{1}{R} (N_\theta^* - \nu N_x^*) \right];$$

Для определения неизвестных констант после интегрирования, добавим граничные условия на торцах оболочки:

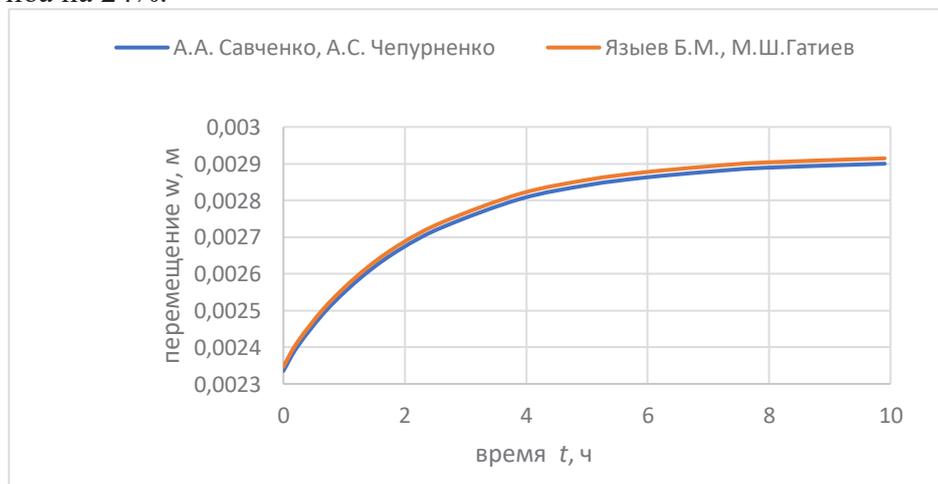
$$\begin{cases} x = 0; \frac{dw}{dx} = 0; w = 0; \\ x = h; M_x = -D \frac{d^2 w}{dx^2} - M_x^* = 0, \quad Q_x = \frac{dM_x}{dx} = -D \frac{d^3 w}{dx^3} - \frac{dM_x^*}{dx}. \end{cases}$$

Решение будем искать численно, методом сеток [6-10]. Подобную задачу рассматривали проф. Чепурненко А.С. и соискатель А.А. Савченко для ПЭВП методом конечных элементов. Для сравнения нами выполнен расчет с такими же исходными данными [3]. Деформации ползучести  $\epsilon_x^*, \epsilon_\theta^*, \gamma_{x\theta}^*$  определялись по методике, приведенной в работе [4,7-12]. Исходные данные сведены в табл. 1.

**Таблица 1. Исходные параметры**  
**Table 1. Initial parameters**

Упругие константы/ Elastic constants		Реологические параметры/Rheological parameters		
$E = 148 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}$	$\nu = 0.3$	$E_\infty = 599 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}$	$m^* = 1.3 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}$	$\eta_0^* = 0,91 \cdot 10^5 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} \cdot \text{мин}$
$h = 3 \text{ см}, \quad l = 300 \text{ см}, \quad R = 200 \text{ см}, \quad \gamma = 10 \text{ кН/м}^3.$				

На рис. 2 представлены график изменения во времени максимальной величины прогиба  $w$ . С течением 10 часов, в процессе ползучести, произошло увеличение максимального прогиба на 24%.



**Рис. 2. Изменение максимального прогиба во времени**  
**Fig. 2. Change in maximum deflection over time**

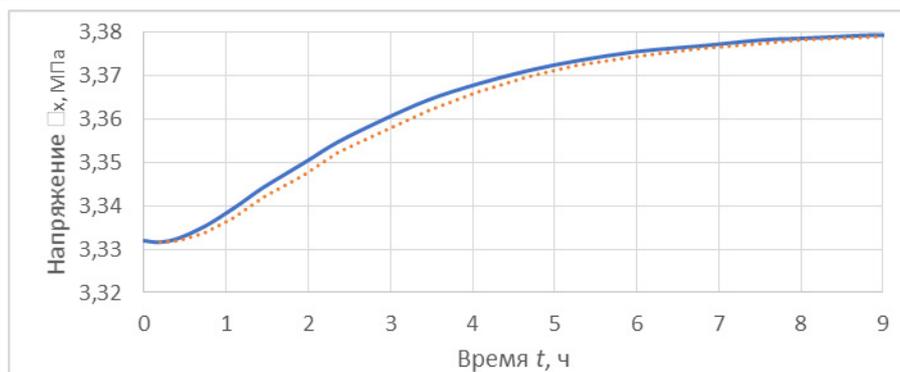


Рис. 3. График роста напряжений  $\sigma_x$  во времени  
Fig. 3. Graph of stress growth  $\sigma_x$  over time

На рис. 3-4 приведено соответственно изменение напряжений  $\sigma_x$  и  $\sigma_\theta$  в основании при  $z = -h/2$ . Анализ результатов показал, что напряжения  $\sigma_x$  остаются практически постоянными, а напряжения  $\sigma_\theta$  выросли чуть более чем на 12%.

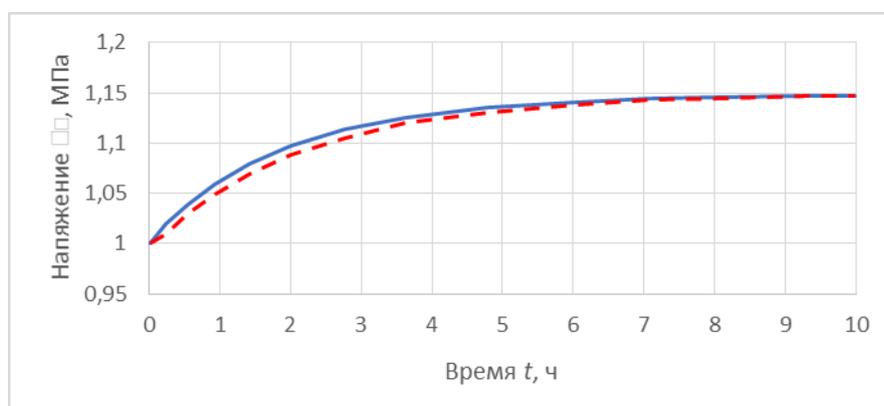


Рис. 4. Эволюционный рост напряжений  $\sigma_\theta$  во времени  
Fig. 4. Evolutionary growth of stresses  $\sigma_\theta$  over time

**Вывод.** Разработанная методика позволяет моделировать работу цилиндрической оболочки под действием гидростатического давления из любого материала в условиях ползучести. Результаты могут быть использованы при расчете напряженно-деформированного состояния указанных конструкций для любых граничных условий и внешних воздействий.

#### Библиографический список:

1. Рабинович, А.Л. Введение в механику армированных полимеров [Текст]/ А. Л. Рабинович. – М.: Наука, 1970. – 483 с.
2. Петров В. В. Расчет неоднородных по толщине оболочек с учётом физической и геометрической нелинейностей //Academia. Архитектура и строительство. – 2016. – №. 1. – С. 112-117.
3. Yazyev B. M., Chepurnenko A. S., Saibel A. V. Modeling of stress-strain state of thick concrete slabs taking the creep of concrete into account //International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2017. – Т. 13. – №. 4. – С. 140-148.
4. Дудник А.Е., Чепурненко А.С., Никора Н.И., Денего А.С. Плоское деформированное состояние полимерного цилиндра в условиях термовязкоупругости // Инженерный вестник Дона, 2015, №2 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2p2y2015/3063](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2p2y2015/3063).
5. Andreev V.I., Yazyev B.M., Chepurnenko A.S. On the bending of a thin polymer plate at nonlinear creep // Advanced Materials Research. 2014. Vol. 900. pp. 707-710.
6. 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.
7. 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.
8. Козельская М.Ю., Чепурненко А.С., Литвинов С.В. Применение метода Галёркина при расчете на устойчивость сжатых стержней с учетом ползучести // Инженерный вестник Дона, 2013, №2 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1714](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1714).

9. Юхнов И.В., Языев Б.М., Чепурненко А.С., Литвинов С.В. Продольный изгиб гибкой железобетонной стойки при нелинейной ползучести //Современные проблемы науки и образования. 2014. № 5. С. 182.
10. Чепурненко А.С., Юхнов И.В., Аваков А.А., Никора Н.И. Устойчивость дюралюминиевой арки при высокотемпературной ползучести//Научное обозрение. 2014. №10-2. С. 406-410.
11. 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.
12. Chepurnenko A.S., Andreev V.I., Beskopylny A.N., Jazyev B.M. Determination of Rheological Parameters of Polyvinylchloride at Different Temperatures//MATEC Web of Conferences. 2016. URL: [mateconferences.org/articles/mateconf/pdf/2016/30/mateconf\\_smae2016\\_06059.pdf](http://mateconferences.org/articles/mateconf/pdf/2016/30/mateconf_smae2016_06059.pdf).

#### References

1. Rabinovich, A.L. Introduction to the mechanics of reinforced polymers [Text] M.: Nauka, 1970; 483 (In Russ).
2. Petrov V.V. Calculation of shells of non-uniform thickness taking into account physical and geometric nonlinearities. *Academia. Architecture and construction*. 2016; 1: 112-117. (In Russ).
3. Yazyev B. M., Chepurnenko A. S., Saibel A. V. Modeling of stress-strain state of thick concrete slabs taking the creep of concrete into account. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2017; 13(4): 140-148.
4. Dudnik A.E., Chepurnenko A.S., Nikora N.I., Denego A.S. Flat deformed state of a polymer cylinder under thermoviscoelastic conditions. *Engineering Bulletin of the Don*, 2015;2 URL: [vdon.ru/ru/magazine/archive/n2p2y2015/3063](http://vdon.ru/ru/magazine/archive/n2p2y2015/3063). (In Russ).
5. Andreev V.I., Yazyev B.M., Chepurnenko A.S. On the bending of a thin polymer plate at nonlinear creep. *Advanced Materials Research*. 2014; 900: 707-710.
6. 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.
7. Yazyev B.M., Chepurnenko A.S., Litvinov S.V., Kozelskaya M. Yu. Stress-strain state of a prestressed reinforced concrete cylinder taking into account concrete creep. *Scientific review*. 2014;11:759-763. (In Russ).
8. Kozelskaya M.Yu., Chepurnenko A.S., Litvinov S.V. Application of the method Galerkin when calculating the stability of compressed rods taking into account creep. *Engineering Bulletin of the Don*, 2013; 2 URL: [vdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1714](http://vdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1714). (In Russ).
9. Yuxhnov I.V., Yazyev B.M., Chepurnenko A.S., Litvinov S.V. Longitudinal bending of a flexible reinforced concrete pillar under nonlinear creep. *Modern problems of science and education*. 2014; 5:182. (In Russ).
10. Chepurnenko A.S., Yuxhnov I.V., Avakov A.A., Nikora N.I. Stability of a duralumin arch under high-temperature creep. *Scientific Review*. 2014;10-2:406-410. (In Russ).
11. 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.
12. Chepurnenko A.S., Andreev V.I., Beskopylny A.N., Jazyev B.M. Determination of Rheological Parameters of Polyvinylchloride at Different Temperatures// MATEC Web of Conferences. 2016. URL: [mateconferences.org/articles/mateconf/pdf/2016/30](http://mateconferences.org/articles/mateconf/pdf/2016/30).

#### Сведения об авторах:

Гатиев Магомед Шамильевич, аспирант, ORCID: 0000-0002-4773-1420, [guvho@mail.ru](mailto:guvho@mail.ru)

Языев Батыр Меретович, доктор технических наук, профессор кафедры «Строительная механика и теория сооружений»; [ps62@yandex.ru](mailto:ps62@yandex.ru); ORCID: 0000-0002-5205-1446

Иванова Юлия Павловна, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Строительство и эксплуатация транспортных сооружений»; [Ypi26@mail.ru](mailto:Ypi26@mail.ru); ORCID: 0009-0009-8082-0191

Клюев Сергей Васильевич, доктор технических наук, доцент профессор кафедры «Теоретической механики и сопротивления материалов»; [klyuev@yandex.ru](mailto:klyuev@yandex.ru); ORCID:0000-0002-1995-6139

#### Information about authors:

Magomed Sh. Gatiev, Graduate Student, ORCID: 0000-0002-4773-1420, [guvho@mail.ru](mailto:guvho@mail.ru)

Batyr M. Yazyev, Dr. Sci. (Eng), Prof. of the Department of “Structural Mechanics and Theory of Structures”; [ps62@yandex.ru](mailto:ps62@yandex.ru); ORCID: 0000-0002-5205-1446

Yulya P. Ivanova, Cand. Sci. (Eng), Senior Lecturer of the Department of Construction and Operation of Transport Facilities; [Ypi26@mail.ru](mailto:Ypi26@mail.ru); ORCID: 0009-0009-8082-0191

Sergey V. Klyuev, Dr. Sci. (Eng), Assoc. Prof., Prof. of the Department of Theoretical Mechanics and Strength of Materials; [klyuev@yandex.ru](mailto:klyuev@yandex.ru); ORCID:0000-0002-1995-6139

#### Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/ Received 09.11.2023.

Одобрена после рецензирования / Reviced 20.11.2023.

Принята в печать /Accepted for publication 20.11.2023.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА  
BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 539.3

DOI: 10.21822/2073-6185-2023-50-4-191-196



Оригинальная статья /Original article

**Устойчивость сжато-растянутого стержня переменного сечения  
при комбинированном нагружении  
Х.П. Культербаев<sup>1</sup>, М.М. Пайзулаев<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Северо-Кавказский федеральный университет,

<sup>1</sup>355017, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1, Россия,

<sup>2</sup>Дагестанский государственный технический университет,

<sup>2</sup>367026, г. Махачкала, пр. И. Шамиля, 70, Россия

**Резюме. Цель.** Целью исследования является определение устойчивости прямолинейного стержня переменного сечения при комбинированном осевом нагружении. **Метод.** Продольный изгиб стержня описывается классической теорией с применением гипотезы Бернулли, а критические силы определяются из задачи Эйлера при соответствующих допущениях. **Результат.** Предложен алгоритм численного метода решения проблемы определения собственных значений дифференциального уравнения продольного изгиба стержня. Внешние нагрузки считаются «мёртвыми». Функции изменения переменной площади поперечного сечения, переменной жёсткости и распределённой нагрузки считаются заданными. Изогнутая ось стержня после бифуркации описывается с помощью линейного обыкновенного дифференциального уравнения. **Вывод.** Реализация численного метода проведена методом конечных разностей с использованием численных методов и современных программных компьютерных средств.

**Ключевые слова:** критические нагрузки и силы, прямолинейный стержень переменного сечения, сжато-растянутый стержень, неравномерно распределённая и переменная распределённая нагрузка, численные методы, программные компьютерные средства, линейно-упругий материал, система сосредоточенных сил, функции изменения переменной площади поперечного сечения, переменная жёсткость, гипотеза Бернулли

**Для цитирования:** Х.П. Культербаев, М.М. Пайзулаев. Устойчивость сжато-растянутого стержня переменного сечения при комбинированном нагружении. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023; 50(4): 191-196. DOI: 10.21822/2073-6185-2023-50-4-191-196

**Stability of a compressed-tensioned rod of variable cross-section with combined loading**

**H.P. Kulterbaev<sup>1</sup>, M.M. Paizulaev<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>North Caucasus Federal University,

<sup>1</sup>1 Pushkina St., Stavropol 355017, Russia,

<sup>2</sup>Daghestan State Technical University,

<sup>2</sup> 70 I.Shamil Ave., Makhachkala 367026, Russia

**Abstract. Objective.** The purpose of the study is to determine the stability of a straight rod of variable cross-section under combined axial loading. **Method.** The longitudinal bending of the rod is described by the classical theory using Bernoulli's hypothesis, and the critical forces are determined from the Euler problem with appropriate assumptions. **Result.** An algorithm for a numerical method for solving the problem of determining the eigenvalues of the differential equation for longitudinal bending of a rod is proposed. External loads are considered "dead". The functions of changing the variable cross-sectional area, variable stiffness and distributed load are considered given. The curved axis of the rod after bifurcation is described using a linear ordinary differential equation. **Conclusion.** The implementation of the numerical method was carried out

by the finite difference method using numerical methods and modern computer software.

**Keywords:** critical loads and forces, straight rod of variable cross-section, compressed-tensioned rod, unevenly distributed and variable distributed load, numerical methods, computer software, linear elastic material, system of concentrated forces, functions of changing variable cross-sectional area, variable stiffness, Bernoulli’s hypothesis

**For citation:** H.P. Kulterbaev, M.M. Paizulaev. Stability of a compressed-tensioned rod of variable cross-section with combined loading. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2023; 50(4): 191-196. DOI: 10.21822/2073-6185-2023-50-4-191-196

**Введение.** Определение критических нагрузок для сжато-растянутых стержней сопряжено со значительными трудностями в нетрадиционных случаях: стержни переменного сечения, неравномерно распределённая нагрузка, сочетание различных нагрузок (сжимающих, растягивающих) и т. д. [1, 9-15]. Отыскание собственных значений и форм в таких задачах точными аналитическими методами возможно лишь в простейших частных случаях. Выход из такого затруднения состоит в применении численных методов [2-8] и компьютерных программ.

**Постановка задачи.** Рассмотрим однородный стержень переменного сечения из линейно-упругого материала, находящийся под действием переменной распределённой нагрузки  $q(x)$  и системы сосредоточенных сил  $P_i$  (рис. 1, показаны только две силы из возможных  $n$ ), действующих вдоль оси. Внешние нагрузки считаются «мёртвыми», т. е. при деформировании стержня они не изменяются ни по величине, ни по направлению.

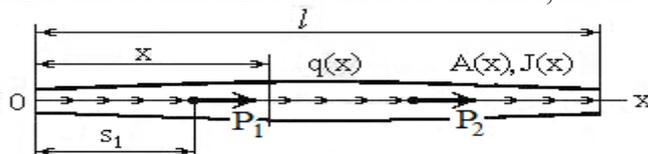


Рис. 1. Однородный стержень переменного сечения

Fig. 1. Homogeneous rod of variable cross-section

Функции изменения переменной площади поперечного сечения  $S(x)$ , переменной жёсткости  $EJ(x)$  и распределённой нагрузки  $q(x)$  будем считать заданными.

**Методы исследования.** В задаче о потере устойчивости прямолинейной формы равновесия примем, что продольный изгиб стержня описывается классической теорией с применением гипотезы Бернулли, а критические силы определяются из задачи Эйлера при соответствующих допущениях. Тогда изогнутая ось стержня после бифуркации описывается с помощью линейного обыкновенного дифференциального уравнения и в традиционных

$$\text{обозначениях имеет вид } B(x)v''(x) = M(x), \quad x \in l, \quad (1)$$

где введено обозначение для переменной жёсткости на изгиб  $B(x) = EJ(x)$ .

Изгибающий момент в правой части уравнения (1) определяется из условия равновесия левой части стержня, отсечённой координатой  $x$ . Например, если левый конец свободен (рис. 2).

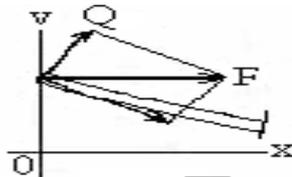


Рис. 2. Поперечная сила

Fig.2. Lateral force

$$M(x) = -\sum P_j[v(x) - v(s_j)] - \int_0^x q(\xi)[v(x) - v(\xi)]d\xi. \quad (2)$$

При учёте (2) уравнение (1) становится интегро-дифференциальным

$$B(x)v''(x) + \sum_{j=1}^k P_j[v(x) - v(s_j)] + \int_0^x q(\xi)[v(x) - v(\xi)]d\xi = 0, \quad x \in l. \quad (3)$$

Для его решения к нему необходимо присоединять граничные условия, которые могут быть самыми разнообразными в зависимости от типа опор. Учёт их работы для обычных случаев влечёт появление четырёх дополнительных условий к уравнению (3) и, следовательно, увеличение порядка производных до четырёх. Тогда целесообразно перейти к дифференциальному уравнению соответствующего порядка. Такой результат достигается после двукратного дифференцирования по переменной  $x$  уравнения (3), в результате чего оно примет вид

$$[B(x)v''(x)]'' + N(x)v''(x) = 0, \quad x \in l, \quad (4)$$

где введено обозначение для продольной сжимающей силы

$$N(x) = \sum_{j=1}^k P_j + \int_0^x q(\xi) d\xi.$$

Уравнение (4) имеет очевидное тривиальное решение  $v(x) \equiv 0$ , что соответствует прямолинейному равновесному положению стержня, т.е. обычному простому сжатию. Такой случай не является предметом интереса данного исследования. Поэтому далее задача будет состоять в том, чтобы найти такой вектор параметров нагрузок, которому могут соответствовать ненулевые решения, т.е. искривлённые положения равновесия.

Вычисление собственных значений и функций дифференциального уравнения (4) аналитическими методами возможно лишь в простейших задачах, где, например,  $B(x) = \text{const}$ ,  $q(x) = \text{const}$ , отсутствуют сочетания нагрузок, и они хорошо изучены.

Отыскание аналитических решений более сложных задач сопряжено со значительными математическими трудностями или в большинстве случаев невозможно.

Выход из такого затруднения состоит в использовании численных методов. Поэтому далее воспользуемся методом конечных разностей [1] и разобьём длину стержня на  $n$  одинаковых отрезков с шагом  $h = l/n$ , с номерами узловых точек  $i = 1, 2, \dots, n, n + 1$ .

Вместо непрерывной функции непрерывного аргумента  $v(x)$  введём сеточную функцию  $y_i \approx v(x_i)$ ,  $x_i = (i-1)h$ . Тогда производные в уравнении (4) можно представлять приближённо в виде конечноразностных соотношений

$$v'(x_i) \approx (y_{i+1} - y_{i-1})/2h, \quad v''(x_i) \approx (y_{i+1} - 2y_i + y_{i-1})/h^2,$$

в силу чего оно примет вид

$$c_{i,i-2}y_{i-2} + c_{i,i-1}y_{i-1} + c_{i,i}y_i + c_{i,i+1}y_{i+1} + c_{i,i+2}y_{i+2} = 0, \quad i = 3, 4, \dots, n-1. \quad (5)$$

При этом к левой части (1) процедура замены второй производной конечноразностным соотношением применена дважды. Коэффициенты уравнения имеют значения

$$c_{i,i-2} = B_{i-1}, \quad c_{i,i-1} = -2(B_{i-1} + B_i) + N_i h^2, \quad c_{i,i} = B_{i-1} + 4B_i + B_{i+1} - 2N_i h^2, \\ c_{i,i+1} = -2(B_i + B_{i+1}) + N_i h^2, \quad c_{i,i+2} = B_{i+1}, \quad i = 3, 4, \dots, n-1.$$

Здесь  $N_i = N(x_i)$ . Система уравнений (5) недоопределённая, её матрица коэффициентов пока является прямоугольной размерности  $(n-3) \times (n+1)$ . Недостающие четыре уравнения могут быть найдены лишь из граничных условий, в силу чего их необходимо конкретизировать. Примем, что левый конец ( $x = 0$ ) свободен, и к нему приложена сила  $P$ .

1) Изгибающий момент равен нулю. Поэтому

$$M(0) = 0 \Rightarrow B(0)v''(0) = 0 \Rightarrow \\ v''(0) = \frac{2y_1 - 5y_2 + 4y_3 - y_4}{h^2} = 0 \Rightarrow 2y_1 - 5y_2 + 4y_3 - y_4 = 0 \quad (6)$$

2) Поперечная сила определяется с помощью функции прогибов

$$Q(0) = [B(0)v''(0)]' \quad (7)$$

и из рис. 2 с учётом малости угла поворота концевого сечения

$$Q(0) = -Pv'(0). \quad (8)$$

Приравнявая правые части (7) и (8), получим  $[B(0)v''(0)]' = -Pv'(0)$ .

Конечно-разностная аппроксимация производных даёт уравнение



отыскиваться критическое значение только одного параметра  $F$ . Прочие исходные данные примем следующими:  $l = 3$  м,  $E = 200$  ГПа. Результат счёта, выданный на экран монитора, показан на рис. 4 в виде графика. Первые элементы спектра собственных значений  $P_k = \{166,7 \quad 788,0\}$  кН.

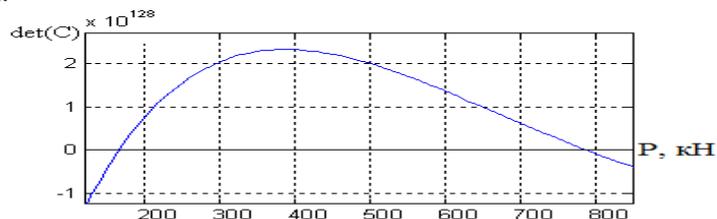


Рис. 4. Результат счёта, выданный на экран монитора

Fig.4. The counting result displayed on the monitor screen

**Вывод.** Резюмируя, можно отметить, что получить этот результат аналитическими методами было бы весьма затруднительно. Между тем, имеется сравнительно простой и универсальный способ определения критических сил, влияющих на устойчивость сжатого стержня переменного сечения при комбинированном нагружении, основанный на возможностях современной вычислительной техники.

Предложен эффективный метод определения собственных значений и форм стержня переменного сечения. Предложен алгоритм численного метода решения проблемы определения собственных значений дифференциального уравнения продольного изгиба стержня. Реализация численного метода проведена методом конечных разностей с использованием численных методов и современных программных компьютерных средств.

#### Библиографический список:

1. Караманский Т.Д. Численные методы строительной механики. –М.: Стройиздат, 1981.-436 с.
2. Самарский А.А., Гулин А.В. Численные методы. М.: Наука, 1989.- 432 с.
3. Ильин В.П., Карпов В.В., Масленников А.М. Численные методы решения задач строительной механики. – М.: Изд-во АСВ; СПб.: СПбГАСУ, 2005. -425 с.
4. Барагунова Л.А. Определение критической силы сжатого стержня методом конечных разностей. Нальчик: Вестник Кабардино-Балкарского государственного университета. 2000. С. 13.
5. Kulterbaev K., Lafisheva M., Baragunova L. (2022). Solving the Euler Problem for a Flexible Support Rod Base on the Finite Difference Method. In: Tchernykh, A., Alikhanov, A., Babenko, M., Samoilenko, I. (eds) Mathematics and its Applications in New Computer Systems. MANCS 2021. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 424. Springer, Cham.
6. Kulterbaev Kh.P., Baragunova L.A., Lafisheva M.M. Calculation of a beam on elastic base analytical and numerical methods //Structural mechanics and structures. 2022. №4(35). Pp.16-23. (in Russ.) DOI 10.36622/VSTU.2022.35.4.002
7. Kulterbaev, K.P., Lafisheva, M.M. (2022). Non-classical Methods of Determination Critical Forces of Compressed Rods. In: Tchernykh, A., Alikhanov, A., Babenko, M., Samoilenko, I. (eds) Mathematics and its Applications in New Computer Systems. MANCS 2021. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 424. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-97020-8\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-030-97020-8_9). pp 91–1021.
8. Kulterbaev, K., Lafisheva, M., Baragunova, L. Solving the Euler Problem for a Flexible Support Rod Base on the Finite Difference Method. In: Tchernykh, A., Alikhanov, A., Babenko, M., Samoilenko, I. (eds) Mathematics and its Applications in New Computer Systems. MANCS 2021. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 424. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-97020-8\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-030-97020-8_13). 2022;143–151.
9. Культербаев Х.П., Абдул Салам И.М., Пайзулаев М.М. Свободные продольные колебания вертикального стержня с дискретными массами при наличии сил демпфирования // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2018; 45(3): 8-17. DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-3-8-17
10. Каган-Розенцвейг Л.М. О влиянии деформаций сдвига на устойчивость стержня переменного сечения. // Вестник гражданских инженеров. 2019. № 6 (77). С. 137-142.
11. Лампси Б.Б., Хазов П.А., Кириллова Н.А. Устойчивость центрально сжатого стержня переменного сечения // Вестник Волжского регионального отделения Российской академии архитектуры и строительных наук. 2018. № 21. С. 139-142.
12. Богданович А.У., Абдюшев А.А. Устойчивость стержня переменного эллиптического сечения при продольном сжатии // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2006. № 2 (6). С. 38-41.

13. Радин В.П., Чирков В.П., Позняк Е.В., Новикова О.В. Устойчивость стержня с упругим шарниром при нагружении распределенной неконсервативной нагрузкой // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2023. № 5 (758). С. 3-13.
14. Ильгамов М.А. Изгиб и устойчивость консольного стержня под действием давления на его поверхности и продольной силы // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. 2021. № 4. С. 77-88.
15. Тарасов В.Н. Влияние поперечной нагрузки на устойчивость сжимаемого продольной силой стержня // Известия Коми научного центра УрО РАН. 2023. № 4 (62). С. 18-22.

#### References

1. Karamansky T.D. Numerical methods of structural mechanics. M.: Stroyizdat, 1981;436. (In Russ)
2. Samarsky A.A., Gulin A.V. Numerical methods. M.: Nauka, 1989; 432. (In Russ)
3. Ilyin V.P., Karpov V.V., Maslennikov A.M. Numerical methods for solving problems of structural mechanics. – M.: Publishing house ASV; St. Petersburg: SPbGASU, 2005; 425. (In Russ)
4. Baragunova L.A. Determination of the critical force of a compressed rod by the finite difference method. Nalchik: Bulletin of Kabardino-Balkarian State University. 2000; 13. (In Russ)
5. Kulterbaev K., Lafisheva M., Baragunova L. (2022). Solving the Euler Problem for a Flexible Support Rod Base on the Finite Difference Method. In: Tchernykh, A., Alikhanov, A., Babenko, M., Samoilenko, I. (eds) Mathematics and its Applications in New Computer Systems. MANCS 2021. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 424. Springer, Cham.
6. Kulterbaev Kh.P., Baragunova L.A., Lafisheva M.M. Calculation of a beam on elastic base analytical and numerical methods. *Structural mechanics and structures*. 2022;4(35):16-23. (In Russ) DOI 10.36622/VSTU.2022.35.4.002
7. Kulterbaev, K.P., Lafisheva, M.M. (2022). Non-classical Methods of Determination Critical Forces of Compressed Rods. In: Tchernykh, A., Alikhanov, A., Babenko, M., Samoilenko, I. (eds) Mathematics and its Applications in New Computer Systems. MANCS Lecture Notes in Networks and Systems, vol 424. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-97020-8\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-030-97020-8_9). 2021; 91–1021.
8. Kulterbaev, K., Lafisheva, M., Baragunova, L. (2022). Solving the Euler Problem for a Flexible Support Rod Base on the Finite Difference Method. In: Tchernykh, A., Alikhanov, A., Babenko, M., Samoilenko, I. (eds) Mathematics and its Applications in New Computer Systems. MANCS Lecture Notes in Networks and Systems, vol 424. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-97020-8\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-030-97020-8_13). 2021;143–151.
9. Kulterbaev Kh.P., Abdul Salam I.M., Paizulaev M.M. Free longitudinal vibrations of a vertical rod with discrete masses in the presence of damping forces. *Herald of the Daghestan State Technical University. Technical science*. 2018; 45(3): 8-17. DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-3-8-17(In Russ)
10. Kagan-Rosenzweig L.M. On the influence of shear deformations on the stability of a rod of variable cross-section. *Bulletin of Civil Engineers*. 2019; 6 (77): 137-142. (In Russ)
11. Lampsey B.B., Khazov P.A., Kirillova N.A. Stability of a centrally compressed rod of variable cross-section. *Bulletin of the Volga Regional Branch of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences*. 2018; 21:139-142. (In Russ)
12. Bogdanovich A.U., Abdyushev A.A. Stability of a rod of variable elliptical cross-section under longitudinal compression. *News of the Kazan State University of Architecture and Civil Engineering*. 2006; 2 (6): 38-41.
13. Radin V.P., Chirkov V.P., Poznyak E.V., Novikova O.V. Stability of a rod with an elastic hinge under loading with a distributed non-conservative load. *News of higher educational institutions. Mechanical engineering*. 2023; 5 (758): 3-13. (In Russ)
14. Ilgamov M.A. Bending and stability of a cantilever rod under the influence of pressure on its surface and longitudinal force. *Izvestia of the Russian Academy of Sciences. Mechanics of solids*.2021;4:77-88.(In Russ)
15. Tarasov V.N. The influence of transverse load on the stability of a rod compressed by longitudinal force. *News of the Komi Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences*. 2023; 4 (62): 18-22. (In Russ)

#### Сведения об авторах:

Культербаев Хусен Пшимурзович, доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник, [kulthp@mail.ru](mailto:kulthp@mail.ru);

Пайзулаев Магомед Муртазалиевич, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой сопротивления материалов, теоретической и строительной механики, [smdstu@mail.ru](mailto:smdstu@mail.ru).

#### Information about authors:

Husen P. Kulterbaev, Dr. Sci. (Eng), Prof., Leading Researcher, [kulthp@mail.ru](mailto:kulthp@mail.ru);

Magomed M. Payzulaev, Cand. Sci. (Eng), Assoc. Prof., Head of the Department Resistance of Materials, Theoretical and Construction Mechanics, [smdstu@mail.ru](mailto:smdstu@mail.ru)

#### Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/ Received 10.11.2023.

Одобрена после рецензирования / Revised 30.11.2023.

Принята в печать /Accepted for publication 30.11.2023.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА  
BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 691.32

DOI: 10.21822/2073-6185-2023-50-4-197-202



Оригинальная статья /Original article

**Современные бетонные композиты для сейсмостойкого строительства**  
**С.-А. Ю. Муртазаев<sup>1,2</sup>, С.Г. Шеина<sup>3</sup>, М.С. Сайдумов<sup>1,4</sup>, И. С.-А. Муртазаев<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>Грозненский государственный нефтяной технический университет  
имени академика М.Д. Миллионщикова,

<sup>1</sup>364051, г. Грозный, пр. Исаева, 100, Россия,

<sup>2</sup>Комплексный научно-исследовательский институт им. Х.И. Ибрагимова РАН,

<sup>2</sup>364051, г. Грозный, ул. В. Алиева (Старопромысловское шоссе), 21, Россия,

<sup>3</sup>Донской государственный технический университет,

<sup>3</sup>344003, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, Россия,

<sup>4</sup>Академия наук Чеченской республики,

<sup>4</sup>364043, г. Грозный, ул. В. Алиева, 19а, Россия

**Резюме. Цель.** Целью исследования является разработка сейсмостойких строительных композитов. **Метод.** Исследование основано на проведении экспериментальных динамических испытаниях мелкозернистого бетона. Аналитически обобщены существующие подходы к обеспечению сейсмической безопасности зданий и сооружений. **Результат.** Представлен отечественный и зарубежный опыт проектирования составов мелкозернистых бетонов для сейсмостойкого строительства. Получены составы мелкозернистых бетонов различных классов с использованием сырья природного и техногенного происхождения. Предложены рецептуры и изучены их строительно-технические и динамические свойства. **Вывод.** Динамическая прочность мелкозернистого бетона повышается с уменьшением времени нагружения, причем при времени нагружения, равном приблизительно 0,01 сек или скорости нагружения около 5000-7000 МПа×сек, это превышение составляет около 30 % по сравнению со статической прочностью бетона. Это позволяет рекомендовать мелкозернистые бетоны для конструкций, испытывающих динамическое воздействие.

**Ключевые слова:** бетонные композиты, мелкозернистые бетонные смеси, сейсмостойкое строительство, заполнители, микрозаполнители, динамическая прочность, абсолютное и относительное отклонение

**Для цитирования:** С.-А. Ю. Муртазаев, С. Г. Шеина, М.С. Сайдумов, И. С.-А. Муртазаев. Современные бетонные композиты для сейсмостойкого строительства. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023; 50(4): 197-202. DOI: 10.21822/2073-6185-2023-50-4-197-202

**Modern concrete composites for earthquake-resistant construction**

**S.-A. Yu. Murtazaev<sup>1,2</sup>, S.G. Sheina<sup>3</sup>, M.S. Saidumov<sup>1,4</sup>, I. S.-A. Murtazaev<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>Acad. M.D. Millionshchikov Grozny State Oil Technical University,

<sup>1</sup>100 Kh. Isaev Ave., Grozny, 364051, Russia,

<sup>2</sup>Kh.I. Ibragimov Complex Research Institute of the Russian Academy of Sciences,

<sup>2</sup>21 V. Alieva (Staropromyslovskoe highway), Grozny 364051, Russia,

<sup>3</sup>Don State Technical University,

<sup>3</sup>Gagarin Square, Rostov-on-Don 344003, Russia,

<sup>4</sup>Academy of Sciences of the Chechen Republic,

<sup>4</sup>19a V. Alieva St., Grozny 364043, Russia

**Abstract. Objective.** The purpose of the research is to develop earthquake-resistant building composites **Method.** The study is based on experimental dynamic testing of fine-grained concrete.

Existing approaches to ensuring seismic safety of buildings and structures are analytically summarized. **Result.** Domestic and foreign experience in designing fine-grained concrete compositions for earthquake-resistant construction is presented. Compositions of fine-grained concrete of various classes were obtained using raw materials of natural and man-made origin. Recipes were proposed and their construction, technical and dynamic properties were studied. **Conclusion.** The strength of fine-grained concrete increases with decreasing loading time, and at a loading time of approximately 0.01 sec or a loading rate of about 5000-7000 MPa sec, this excess is about 30% compared to the statistical strength of concrete. This allows us to recommend fine-grained concrete for structures experiencing dynamic impact.

**Keywords:** concrete composites, fine-grained concrete mixtures, earthquake-resistant construction, aggregates, microfillers, dynamic strength, absolute and relative deviation

**For citation:** S.-A. Yu. Murtazaev, S. G. Sheina, M.S. Saidumov, I. S.-A. Murtazaev. Modern concrete composites for earthquake-resistant construction. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2023; 50(4): 197-202. DOI: 10.21822/2073-6185-2023-50-4-197-202.

**Введение.** Разработка современных подходов к комплексному проектированию методов и способов сейсмостойкого строительства остается важнейшей проблемой во всех сейсмоопасных регионах страны и мира. Недавнее землетрясение в приграничных районах Сирии и Турции показало насколько ответственной является задача неукоснительного соблюдения действующих и разработка новых норм и правил сейсмостойкого строительства с учетом целого комплекса вопросов как организационно-технического характера, так и производственно-технологического характера.

**Постановка задачи.** Как известно, задачей №1 строительства в районах с повышенной сейсмической активностью, предполагающей высокобальное землетрясения с большей вероятностью, является сохранение жизни человека. Для решение этой задачи на всех этапах жизненного цикла зданий и сооружений необходимо учитывать особенности строительства и эксплуатации применительно к условиям сейсмической активности. Причем, предлагаемые для этого решения должны носить комплексный характер, начиная от выбора площадки строительства, конструктивных элементов фундаментов, несущего каркаса здания и применяемых материалов для предлагаемых конструктивных элементов. Именно на последних хотелось бы сделать акцент и сформулировать современные подходы к получению сейсмостойких строительных композитов.

Прочность строительных материалов и конструкций зависит не только от физических свойств, но во многом определяется теми условиями, в которых они находятся при эксплуатационных нагрузках. В условиях землетрясений прочностные характеристики материалов, естественно, будут в большей степени определяться особенностями самой сейсмической нагрузки [1-4].

Одной из таких особенностей, характерной для любого землетрясения, является кратковременность действия нагрузки, т.е. сравнительно малое количество циклов ее повторения. Другим фактором, имеющим большое значение для работы строительных конструкций и материалов, является частота нагрузки.

**Методы исследования.** Как показывают многочисленные экспериментальные исследования, оказывается, что независимо от частот внешнего воздействия, сооружения обычно колеблются с частотой, отвечающей частоте их собственных колебаний. Периоды же свободных колебаний большинства зданий и сооружений составляют около 0,1-2,0 с, и, следовательно, частота динамической нагрузки, испытываемой сооружением в условиях землетрясений, будет находиться в основном в пределах 0,5-10 Гц.

Рассматривая несущую способность конструкций и материалов, следует иметь в виду, что сильное землетрясение - явление относительно редкое, поэтому обеспечение эксплуатационной полноценности объектов после землетрясения представляется

экономически не целесообразным, так как срок службы таких зданий может быть меньше периода повторяемости сильных землетрясений. Поэтому в сейсмостойком строительстве не ставится требование обеспечения полной сохранности и годности к дальнейшей эксплуатации зданий, перенесших землетрясения; главное, как было отмечено выше, - обеспечить безопасность людей и сохранность наиболее ценного оборудования. Такое требование определяет понятие предельного состояния конструкции, которое позволяет любые деформации, не приводящие к обрушению конструкции. В этих условиях предельная несущая способность конструкций может определяться только предельными прочностными характеристиками материалов.

Например, несущая способность железобетонных конструкций не должна ограничиваться моментом появления в арматуре напряжений, соответствующих пределу текучести арматурной стали, она должна определяться ее пределом прочности, что, естественно, приводит к существенному увеличению несущей способности.

Как отмечалось, несущая способность стали, бетона, железобетона и других материалов в условиях сейсмических воздействий определяется в основном динамическим характером нагрузки при сравнительно небольшом количестве циклов ее действия. При этом прочностные характеристики, естественно, будут отличаться как от прочности при однократном быстром нагружении (ударе), так и от прочности при большом, исчисляемом миллионами циклов, числе нагружении (усталостной прочности).

Поскольку прочность материалов в области немногочисленных повторных нагружений в известной степени связана и с их ударной, и усталостной прочностью, используют более общую характеристику несущей способности материалов при различных видах нагружения – динамическую прочность. Способность сопротивляться сейсмическим воздействиям бетонных конструкций зависит от динамической прочности, причем эта зависимость носит линейный характер.

**Обсуждение результатов.** При динамических испытаниях мелкозернистого бетона определялось влияние различных технологических факторов (состава бетона, качества заполнителей, условий выдерживания, механохимической активации) на коэффициент динамического упрочнения. Было изготовлено несколько серий образцов мелкозернистого бетона [5, 6]. В каждую серию входило 25 образцов – цилиндров диаметром и высотой 5 см. Перемешивание смеси на виброплощадке обеспечивало высокую ее однородность. Поскольку подвижность смеси (за исключением серии 5) составляла 115-125 мм по расплыву встряхивающего конуса, она достаточно хорошо уплотнялась вручную. Через сутки образцы распалубливали и далее хранили в воде при температуре около 20 °С.

За 4-5 суток до испытания образцы вынимали из ванны и выдерживали на воздухе при температуре около 20 °С и относительной влажности 65-70 %. Возраст бетона различных серий в момент испытания составлял от 14 до 73 суток, причем статические и динамические испытания проводились одновременно, в один и тот же день. Испытывали три группы образцов: одна группа из 7-8 образцов испытывалась при статическом нагружении и две группы по 7-8 образцов – при динамическом нагружении (при  $T_{двн}$  приблизительно 0,01 и 0,12 сек). Составы мелкозернистого бетона различных серий указаны в табл. 1.

Таблица 1. Составы мелкозернистого бетона

Table 1. Compositions of fine-grained concrete

№ составов /compositions	Ц:П	В/Ц	Возраст в момент испытания, сут/ Age at time tests, days	Среднее значение статического предела прочности при сжатии, МПа/ Average value of static compressive strength
1	1:2	0,38	72	67,2
2	1:1,5	0,32	71	78,0
3	1:2	0,35	54	55,1
4	1:2	0,44	51	45,9
5	1:2	0,48	29	57,3
6	1:2	0,40	14	20,7

Все серии были изготовлены на портландцементе активностью 44,6 МПа и удельной поверхностью 3670 см<sup>2</sup>/г. Образцы серии 3 были изготовлены на смешанном цементе, полученном совместным помолом портландцемента с песком в соотношении 1:1 в вибромельнице в течении 30 мин. Удельная поверхность смешанного цемента 7800 см<sup>2</sup>/г. Для бетона серии 1-3,5,6 был использован кварцевый песок средней крупности ( $M_k=2,61$ , полный остаток на сите 0,63 мм – 44 %, пустотность – 42,5 %, прошло через сито 0,14 мм – 3,7 %), для бетона серии 4 – мелкий песок ( $M_k=1,29$ , остаток на сите 0,63 мм – 4,8 %, пустотность – 47 %, прошло через сито 0,14 мм – 14 %). Образцы серии 6 пропаривали в течение 8 ч при температуре 90-95°C. Динамические испытания образцов мелкозернистого бетона были проведены на пневмодинамической установке. Результаты статических испытаний мелкозернистого бетона приведены в табл. 1.

В табл. 2 приведена сравнительная оценка результатов опытов, позволяющая выявить влияние технологии на динамическую прочность мелкозернистого бетона.

**Таблица 2. Сравнительная оценка влияния технологии на динамическую прочность мелкозернистого бетона**

**Table 2. Comparative assessment of the influence of technology on the dynamic strength of fine-grained concrete**

№ серии	$R_{ст}$ , МПа	Среднее значение $\tau_{д.у}$ , сек Average value	$R_d$ , МПа	$\tau_{д.у}$	Среднее значение $R_{д.у}$ при данном $\tau_{д.у}$ по испытаниям обычного бетона/ Average across trials ordinary concrete	$\phi$ , %	$\beta$ , %
1	67,2	0,097	87,3	1,3	1,29	+0,8	+3
		0,117	75,8	1,13	1,15	-1,7	-13
2	78,0	0,0127	100,1	1,29	1,27	+0,8	+4
		0,133	91,2	1,17	1,15	+1,7	+13
3	55,1	0,009	72,0	1,31	1,30	+0,8	+3
		0,126	68,0	1,23	1,15	27	+53
4	45,9	0,009	57,9	1,26	1,30	-3,1	-13
		0,100	50,4	1,11	1,16	-4,3	-31
5	57,3	0,009	71,9	1,26	1,30	-3,1	-13
		0,124	65,6	1,14	1,15	-2,6	-7
6	20,7	0,009	26,5	1,28	1,30	-1,5	-7
		0,119	22,9	1,11	1,15	-3,5	-27

Для большей наглядности здесь наряду с отклонением в величине коэффициента динамического упрочнения указано отклонение в том приросте прочности  $\Delta R_d$ , который наблюдается при быстром нагружении. Оно точнее характеризует особенности поведения материала при динамическом нагружении. Например, если средний коэффициент  $R_{д.у}$  при  $\tau_{макс}=0,01$  сек составит 1,3, а в каком-то опыте упрочнение не будет обнаружено совсем,

$$\varphi = \frac{R_{д.у} - R_{\varphi}}{R_{\varphi}} \times 100\%$$

т.е.  $R_d = R_{ст}$ , то отклонение  $R_{\varphi}$  составит всего 23 %, а отклонение

$\beta = \frac{\Delta R - R_{\varphi}}{\Delta R}$  составит 100 %, т.е. покажет нам, что упрочнения нет ( $\Delta R$  - прирост прочности в конкретном опыте, а  $\Delta R$  – средний прочности для бетона). Если величина отклонения окажется более 100 %, то это будет означать, что прочность бетона при динамическом нагружении меньше прочности при статических испытаниях.

**Вывод.** Полученные результаты опытов позволяют сделать следующие выводы. Прочность мелкозернистого бетона повышается с уменьшением времени нагружения, причем при времени нагружения, равном приблизительно 0,01 сек или скорости нагружения около 5000-7000 МПа×сек, это превышение составляет около 30 % по сравнению со статической прочностью бетона. Характер разрушения образцов при динамическом и статическом нагружении внешне одинаков. Повышение плотности и уменьшение дефектов в цементном камне, приготовленном на смешанном цементе, домолотом с песком, несколько улучшило сопротивление мелкозернистого бетона динамическому нагружению.

Применение мелкого песка, пропаривания или бетонной смеси с повышенным В/Ц несколько снизило динамическую прочность по сравнению со средними ее значениями, ожидаемыми для данного времени нагружения. Динамическая прочность мелкозернистого бетона оптимальных составов оказалась несколько выше, чем у обычного бетона (рис. 1). Это позволяет рекомендовать мелкозернистые бетоны для конструкций, испытывающих динамическое воздействие.

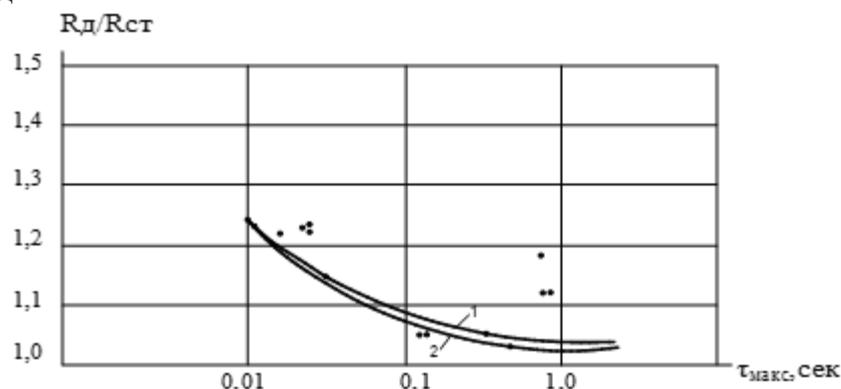


Рис.1. Динамическая прочность мелкозернистого (1) и обычного (2) бетонов  
Fig.1. Dynamic strength of fine-grained (1) and ordinary (2) concrete

Рассмотренные технологические факторы в целом сравнительно мало влияют на динамическую прочность бетона, если при изготовлении обеспечивается его высокое качество. Это позволяет широко варьировать составы, материалы и технологию изготовления железобетонных конструкций, испытывающих быстрое общее нагружение материала (но не местные удары).

#### Библиографический список:

1. Баженов Ю.М. Бетон: технологии будущего / Ю.М. Баженов // Строительство: новые технологии – новое оборудование. -М.: ИД "Панорама", 2009. -№ 8. -С.29-32.
2. Европейский нормативный документ по самоуплотняющемуся бетону: DAfStb-Richtlinie Selbstverdichtender Beton (SVB-Richtlinie). Ausgabe November 2003.
3. Hillemeier В., Buchenau G., Herr R., Huttл R., Klubendorf St., Schubert K.: Spezialbetone, Betonkalender, Ernst & Sohn, 2006. -№1. -С.534-549.
4. Каприелов С.С. Модифицированные высокопрочные бетоны классов В80 и В90 в монолитных конструкциях. Ч. II / С.С. Каприелов [и др.] // Строительные материалы. - 2008. - №3. - С.9-13.
5. Монолитное строительство на территории России: история внедрения и перспективы развития. Сайт ООО «НПО «АНТАРЕС трейд». Санкт-Петербург, 2015. URL: [http://antares-stroy.ru/encyclopedia/monolitnoe\\_stroitelstvo\\_na\\_territorii\\_rossii/](http://antares-stroy.ru/encyclopedia/monolitnoe_stroitelstvo_na_territorii_rossii/)
6. Баженов Ю.М., Демьянова В.С., Калашников В.И. Модифицированные высококачественные бетоны / Научное издание. - М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2006. - 368 с.
7. Баженов Ю.М., Батаев Д.К-С., Муртазаев С-А.Ю. [и др.]. Мелкозернистые бетоны из вторичного сырья для ремонта и восстановления поврежденных зданий и сооружений / Грозный, 2011. -342 с.
8. Муртазаев С-А.Ю., Батаев Д.К-С., Исмаилова З.Х. [и др.]. Мелкозернистые бетоны на основе наполнителей из вторичного сырья -М.: «Комтех-принт», 2009. -142 с.
9. Баженов Ю.М., Алимов Л.А., Воронин В.В. [и др.]. Технология бетона, строительных изделий и конструкций. -М.: Изд-во АСВ, 2008. - 350 с.
10. Лермит Р. Проблемы технологии бетона. Издательство ЛКИ, 2007. -296 с.
11. Лесовик В.С. Строительные композиты на основе отсевов дробления бетонного лома и горных пород / В.С. Лесовик, С-А.Ю. Муртазаев, М.С. Сайдумов // Грозный, МУП «Типография», 2012. 192 с.
12. Федосов Н.Н. Новые строительные материалы / Н.Н. Федосов, Е.С. Клиничук, Т.Л. Вербицкая // Строительные материалы. – 2010. - № 3. – С. 67-68.
13. Кудрявцев А.П. Разработка в РААСН новых высокопрочных и долговечных строительных композиционных материалов / А.П. Кудрявцев // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века.- 2006. - № 5. – С. 14-15.
14. Батраков В.Г., Модификаторы бетона новые возможности // Материалы I Всероссийской конференции по бетону и железобетону. М., 2001. -С. 184-197.
15. Murtazaev, S.-A.Y., Mintsaeв, M.S., Saydumov, M.S., Aliev, S.A. Strength and strain properties of concrete, comprising filler, produced by screening of waste crushed concrete // Modern Applied Science, 2015. -Vol.9. – № 4. – P.32-44.

16. Kuladzhi, T.V., Murtazaev, S.I., Taimaskhanov, K.E., Aliiev, S.A., Mintsaeв, M.S. Professor M. D. Kargopolov's matrix formula-an effective tool to find the cost of construction products // *Indian Journal of Science and Technology*, Volume 8, Issue 29, Nov., 2015
17. Комохов П.Г. Шангина, Н.Н. Модифицированный цементный бетон, его структура и свойства // *Цемент*. 2002. -№1-2. -С. 43-46.

#### References

1. Bazhenov Yu.M. Concrete: technologies of the future. *Construction: new technologies – new equipment*. M.: Publishing House "Panorama", 2009; 8:29-32. (In Russ)
2. European normative document for self-compacting concrete: DAfStb-Richtlinie Selbstverdichtender Beton (SVB-Richtlinie). Ausgabe November 2003.
3. Hillemeier B., Buchenau G., Herr R., Huttl R., Klubendorf St., Schubert K.: *Spezialbetone, Betonkalender*, Ernst & Sohn, 2006; 1:534-549.
4. Kapriellov S.S. Modified high-strength concrete of classes B80 and B90 in monolithic structures. Part II . S.S. Kapriellov [and others]. *Construction materials*. 2008; 3:9-13. (In Russ)
5. Monolithic construction on the territory of Russia: history of implementation and development prospects. Website of NPO ANTARES Trade LLC. St. Petersburg, 2015. URL: [http://antares-stroy.ru/encyclopedia/monolitnoe\\_stroitelstvo\\_na\\_territorii\\_rossii/](http://antares-stroy.ru/encyclopedia/monolitnoe_stroitelstvo_na_territorii_rossii/)(In Russ)
6. Bazhenov Yu.M., Demyanova V.S., Kalashnikov V.I. Modified high-quality concretes. *Scientific publication*. - M.: Publishing House of the Association of Construction Universities, 2006; 368. (In Russ)
7. Bazhenov Yu.M., Bataev D.K-S., Murtazaev S-A.Yu. Fine-grained concrete from recycled materials for repair and restoration of damaged buildings and structures.[and others]. Grozny, 2011; 342. (In Russ)
8. Murtazaev S-A.Yu., Bataev D.K-S., Ismailova Z.Kh. [and etc.]. Fine-grained concrete based on fillers from recycled materials - M.: "Komtekhn-print", 2009;142. (In Russ)
9. Bazhenov Yu.M., Alimov L.A., Voronin V.V. [and etc.]. Technology of concrete, building products and structures. -M.: Publishing House ASV, 2008; 350. (In Russ)
10. Lhermit R. Problems of concrete technology. LKI Publishing House, 2007;296. (In Russ)
11. Lesovik B.C. Construction composites based on screenings from crushing concrete scrap and rocks. B.C. Lesovik, S-A.Yu. Murtazaev, M.S. Saidumov. Grozny, MUP "Printing", 2012; 192. (In Russ)
12. Fedosov N.N. New building materials / N.N. Fedosov, E.S. Klinchuk, T.L. Verbitskaya. *Construction materials*. 2010; 3: 67-68. (In Russ)
13. Kudryavtsev A.P. Development of new high-strength and durable construction composite materials at RAASN. *Construction materials, equipment, technologies of the XXI century*. 2006; 5:14-15. (In Russ)
14. Batrakov V.G., Concrete modifiers new opportunities. *Materials of the I All-Russian Conference on Concrete and Reinforced Concrete*. M., 2001; 184-197. (In Russ)
15. Murtazaev, S.-A.Y., Mintsaeв, M.S., Saydumov, M.S., Aliev, S.A. Strength and strain properties of concrete, comprising filler, produced by screening of waste crushed concrete. *Modern Applied Science*, 2015; 9(4):32–44.
16. Kuladzhi, T.V., Murtazaev, S.I., Taimaskhanov, K.E., Aliiev, S.A., Mintsaeв, M.S. Professor M. D. Kargopolov's matrix formula-an effective tool to find the cost of construction products. *Indian Journal of Science and Technology*, 2015; 8(29)
17. Komokhov P.G. Shagina, N.N. Modified cement concrete, its structure and properties. *Cement*. 2002; 1-2: 43-46. (In Russ)

#### Сведения об авторах:

Муртазаев Сайд-Альви Юсупович, доктор технических наук, профессор, проректор по инвестиционной деятельности и имущественному комплексу; заведующий кафедрой «Технология строительного производства»; [murtazaev@gstou.ru](mailto:murtazaev@gstou.ru)

Шейна Светлана Георгиевна, доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Городское строительство и хозяйство», [rgsu-gsh@mail.ru](mailto:rgsu-gsh@mail.ru)

Сайдумов Магомед Саламувич, кандидат технических наук, доцент, проректор по научной работе; [saidumov\\_m@mail.ru](mailto:saidumov_m@mail.ru)

Муртазаев Имран Саид-Альвиевич, ассистент; [s.murtazaev@mail.ru](mailto:s.murtazaev@mail.ru)

#### Information about authors:

Said-Alvi Yu.Murtazaev, Dr. Sci. (Eng), Prof., Vice-Rector for Investment Activities and Property Complex; Head of the Department of Construction Technology; [s.murtazaev@mail.ru](mailto:s.murtazaev@mail.ru)

Svetlana G. Sheina, Dr. Sci. (Eng), Prof., Head of the Department of Urban Development and Economy, [rgsu-gsh@mail.ru](mailto:rgsu-gsh@mail.ru)

Magomed S. Saidumov, Cand. Sci. (Eng), Assoc. Prof., Vice-Rector for Research; [saidumov\\_m@mail.ru](mailto:saidumov_m@mail.ru)

Imran S.-A. Murtazaev, assistant; [s.murtazaev@mail.ru](mailto:s.murtazaev@mail.ru)

#### Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/ Received 05.10.2023.

Одобрена после рецензирования / Revised 28.10.2023.

Принята в печать /Accepted for publication 28.10.2023.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА  
BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 691.175.743/620.193.19

DOI: 10.21822/2073-6185-2023-50-4-203-209



Оригинальная статья /Original article

**Исследование герметичности одинарных швов ПВХ-мембран LOGICBASE™ /  
ECOBASE™ в системах инженерной гидроизоляции**

**В.Н. Шалимов<sup>1</sup>, А.В. Цыбенко<sup>1</sup>, И.Н. Гоглев<sup>1</sup>, С.А. Логинова<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Корпорация «Технониколь»,

<sup>1</sup>129110, г. Москва, ул. Гиляровского, д. 47, стр. 5, Россия,

<sup>2</sup>Ярославский государственный технический университет,

<sup>2</sup>150023, г. Ярославль, Московский пр-кт, 88, Россия

**Резюме. Цель.** В настоящее время системы инженерной гидроизоляции с использованием полимерных гидроизоляционных мембран широко применяются на различных строительных объектах. Эксплуатация полимерных мембран подразумевает работу сварных швов на разрыв, прочность которых должна быть не менее прочности самого гидроизоляционного материала. Целью исследования является оценка водонепроницаемости одинарных швов (без проверочных каналов, сваренных ручным или автоматическим оборудованием) для полимерных мембран LOGICBASE™ / ECOBASE™ марок V-SL при давлении 1 МПа. **Метод.** Испытание гидроизоляционных швов на водонепроницаемость проводятся согласно требованиям ГОСТ EN 1928-2011, метод В. В качестве испытательной установки используется прибор для испытания гидростатическим напором фирмы GESTER модели GT-C26B. Для сварки образцов применялось сварочное оборудование компании LEISTER моделей VarimatV2 (автоматическое оборудование) и TriacAT (ручное оборудование). Ширина сварного шва составляла не менее 30 мм. **Результат.** При давлении гидростатического напора 1 МПа в течение 24 часов с начала испытания выявлено отсутствие следов проникновения воды в образцах, что говорит о полной водонепроницаемости швов. **Вывод.** Одинарные швы ПВХ-мембран для инженерной гидроизоляции LOGICBASE™ / ECOBASE™ полностью герметичны при давлении воды 1 МПа.

**Ключевые слова:** гидроизоляция, ПВХ-мембраны, вторичная защита, коррозия бетона, водонепроницаемость, гидростатическое давление

**Для цитирования:** В.Н. Шалимов, А.В. Цыбенко, И.Н. Гоглев, С.А. Логинова. Исследование герметичности одинарных швов ПВХ-мембран LOGICBASE™ / ECOBASE™ в системах инженерной гидроизоляции. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023; 50(4):203-209. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-4-203-209

**Study of the tightness of single seams of LOGICBASE™ / ECOBASE™ PVC membranes  
in engineering waterproofing systems**

**V.N. Shalimov<sup>1</sup>, A.V. Tsybenko<sup>1</sup>, I.N. Goglev<sup>1</sup>, S.A. Loginova<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>TechnoNIKOL Corporation,

<sup>1</sup> 47 Gilyarovskogo St., building 5, Moscow 129110, Russia,

<sup>2</sup>Yaroslavl State Technical University,

<sup>2</sup>88 Moskovsky Ave., Yaroslavl 150023, Russia

**Abstract. Objective.** Currently, engineering waterproofing systems with polymer waterproofing membranes are widely used at various construction structures. At the same time, the usage of polymer membranes implies the operation of break welds, the strength of which should be no less than the strength of the waterproofing material itself. The purpose of the study

is to evaluate the water resistance of single seams (without test channels, welded by manual or automatic equipment) for LOGICBASE™ / ECOBASE™ grade V-SL polymer membranes at a pressure of 1 MPa. **Method.** Testing of waterproofing seams for water resistance is carried out according to the requirements of GOST EN 1928-2011, method B. The GESTER model GT-C26B hydrostatic pressure testing device is used as a test installation. LEISTER welding equipment of Varimat V2 (automatic equipment) and Triac AT (manual/hand equipment) models was used for welding samples. The width of the weld was at least 30 mm. **Result.** At a hydrostatic head pressure of 1 MPa, within 24 hours from the start of the test, there were no traces of water penetration in the samples, which indicates that the seams are completely waterproof. **Conclusion.** Single seams of LOGICBASE™/ECOBASE™ engineered waterproofing PVC membranes are completely sealed at 1 MPa water pressure.

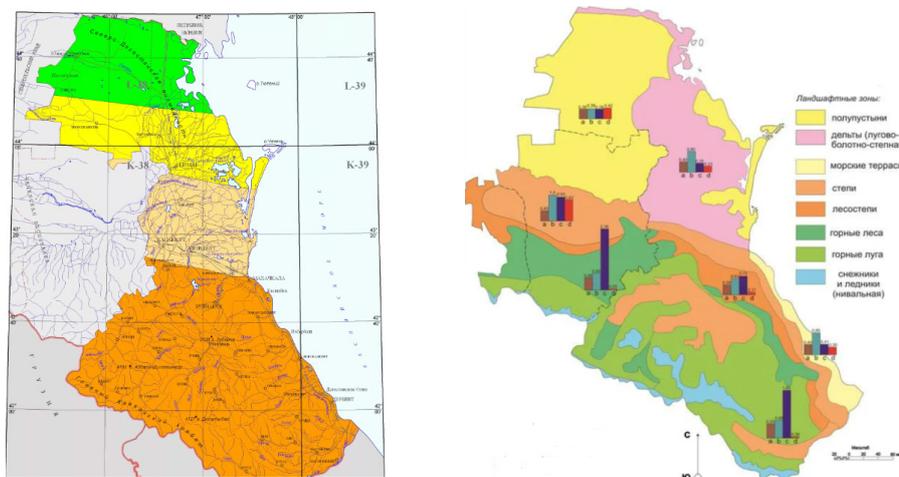
**Keywords:** waterproofing, PVC membranes, secondary protection, concrete corrosion, water resistance, hydrostatic pressure

**For citation:** V.N. Shalimov, A.V. Tsybenko, I.N. Goglev, S.A. Loginova. Study of the tightness of single seams of LOGICBASE™ / ECOBASE™ PVC membranes in engineering waterproofing systems. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2023; 50 (4):203-209. DOI: 10.21822 /2073-6185-2023-50-4-203-209

**Введение.** Гидроизоляционные системы фундаментов и стилобатов из полимерных (ПВХ) мембран широко используются во всех регионах РФ. Главными особенностями и преимуществами [1-3] этих систем являются:

- ремонтпригодность однослойных (с секционированием из гидрошпонок) и двухслойных систем;
- высокая скорость и всепогодность монтажа (при благоприятных условиях бригада из 3-х человек может монтировать 800÷1000 м<sup>2</sup> гидроизоляции за сутки);
- высокая надежность, благодаря двойной инструментальной проверке герметичности (имеется возможность контроля герметичности двойных швов, а также вакуумный контроль герметичности двухслойных гидроизоляционных карт);
- возможность строительства в зонах повышенной сейсмической активности (7,8,9 баллов) [2,3];
- дополнительная защита фундаментов от проникновения метана и радона.

Сложными условиями строительства характеризуются и некоторые районы Республики Дагестан, поскольку, помимо сейсмичности (рис. 1а) [4-6], они обладают большим разнообразием ландшафтных зон (пески, полупустыни, горные леса и луга) (рис. 1б) и др. [7-8].



**Рис. 1. Примеры карт районирования Республики Дагестан: а) в зависимости от интенсивности возрастания сейсмической активности; б) в зависимости от смены ландшафтных зон**  
**Fig. 1. Examples of zoning maps of the Republic of Daghestan: a) depending on the intensity of the increase in seismic activity; b) depending on the change of landscape zones**

В большом количестве разных ландшафтных зон в подземных водах могут встретиться различные агрессивные химические вещества [9,10]. Особенно важен подбор качественных и надежных материалов для уникальных зданий (объектов класса КС-3, согласно ГОСТ 27751-2014) [11-15], поскольку долговечность конструкций фундаментов здания будет прямо зависеть от возможности гидроизоляционного материала выдерживать высокие давления/нагрузки (в том числе и растягивающие, рис.2), а также химический состав подземных вод [3,16]. Гидроизоляционные полимерные мембраны относятся к вторичной защите и позволяют обеспечить защиту бетонных и железобетонных конструкций от коррозионной деструкции, вызванной химическими или биологическими факторами [3,17-19].



Рис. 2. а) Защитный экран из мембраны ECOBASE™ V-UV, выдерживающий давление напорной воды в зоне подземных конструкций; б) мембрана LOGICBASE™ V-SL, выдерживающая отрицательное давление воды в зоне деформационного шва

Fig. 2. a) A protective shield made of ECOBASE™ V-UV membrane that can withstand the pressure water in the zone of underground structures; b) LOGICBASE™ V-SL membrane that can withstand negative water pressure in the zone of the deformation seam

**Постановка задачи.** В течение всего срока эксплуатации на сварные швы полимерных мембран может оказываться значительное давление воды в отдельных участках гидроизоляционных систем. Швы полимерных мембран должны обладать абсолютной водонепроницаемостью при давлениях, не менее значений которых выдерживает непосредственно сам гидроизоляционный материал. В данном исследовании поставлена задача испытать сварные швы полимерных мембран LOGICBASE™ / ECOBASE™ на водонепроницаемость в соответствии с действующими нормативными документами.

**Методы исследования.** Испытания проводились в соответствии с требованиями ГОСТ EN 1928-2011, метод В, который устанавливает методику проведения испытаний на водонепроницаемость для кровельных и гидроизоляционных полимерных (термопластичных или эластомерных) материалов. Метод В применяется именно для тех материалов, которые предназначены для эксплуатации в условиях высоких давлений воды, например, для устройства кровель специального назначения (в том числе и эксплуатируемых), гидроизоляции тоннелей и резервуаров [3,20].

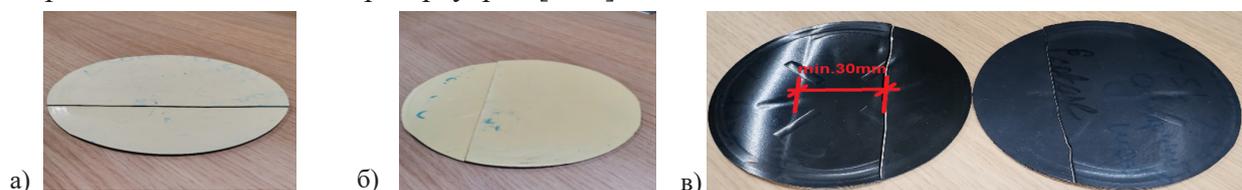


Рис. 2. Образцы для испытаний: а) Образец мембраны LOGICBASE™ V-SL; б) образец мембраны ECOBASE™ V-SL; в) тыльная сторона образцов

Fig. 2. Test samples: a) A sample of the LOGICBASE™ V-SL membrane; б) A sample of the ECOBASE™ V-SL membrane; в) the back of the samples

Образцы мембран LOGICBASE™ / ECOBASE™ марки V-SL (рис. 2 а,б,в) толщиной 2,0 мм с расположенным над ними диском с четырьмя прорезями заданной формы и размеров (рис.5) подвергают воздействию воды при заданном давлении в течение 24 ч (рис.3а), после чего оценивают водонепроницаемость образца (рис.3б).

Принципиальная схема, устройство и детали экспериментальной установки приведены на рис. 4 а,б и 5. Испытательная установка GESTER модели GT-C26B обеспечивает создание заданного давления воды на одну сторону испытательных образцов. На другую сторону образцов

помещают круглый диск с четырьмя прорезями, форма и размеры которых приведены на рис. 5. Перед отбором образцов гидроизоляционные мембраны LOGICBASE™ /ECOBASE™ марки V-SL сваривают с помощью автоматического или ручного оборудования. Сварка осуществлялась аппаратами LEISTER Varimat V2 (автоматическое оборудование) и Triac AT (ручное оборудование).

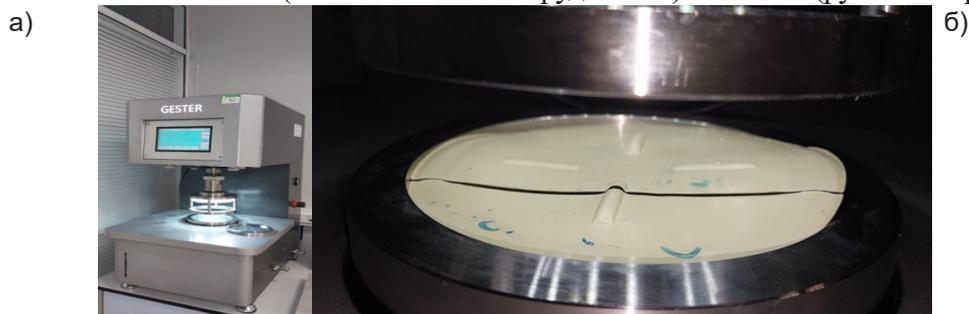


Рис. 3. а) Общий вид испытательной установки; б) Образец мембраны LOGICBASE™ V-SL сразу после проведения испытания

Fig. 3. a) Main view of the test facility; b) Sample of the LOGICBASE™ V-SL membrane after the test

Данные аппараты позволяют выполнить только одинарные швы, без проверочных каналов. Ширина каждого сварного шва составляла не менее 30 мм (рис.2в). Отбор образцов проводят в соответствии с требованиями EN 13416, т.е., вырезают их равномерно по ширине полотна материала на расстоянии не менее 100 мм от его края. Вырезку выполняют из зоны сварного шва таким образом, чтобы тот был расположен примерно посередине каждого образца (рис.2 а,б,в). Далее выполняют маркировку продольного направления образцов (параллельного направлению изготовления гидроизоляционного материала). Подробный состав испытательного оборудования приведен на рис.4,5.

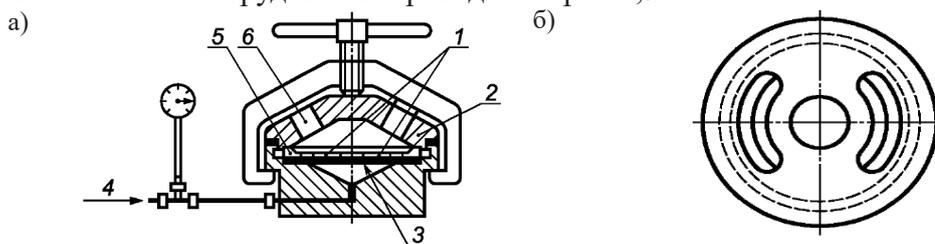


Рис. 4. а) Принципиальная схема испытательной установки для определения водонепроницаемости при высоких давлениях: 1 – прорези; 2 – крышка; 3 – образец; 4 – подача воды под заданным гидростатическим давлением; 5 – диск с прорезями; 6 – смотровое окно. б) Крышка устройства  
Fig. 4.a) A scheme of a test installation for determining water resistance at high pressures: 1 – slots; 2 – cover; 3 – sample; 4 – water supply under a given hydrostatic pressure; 5 – a disk with slots; 6 – viewing window. б) Device cover

Испытания проводят при температуре  $(23 + 5) ^\circ\text{C}$ . В случае необходимости испытания могут провести при температуре  $(23 + 2) ^\circ\text{C}$  и относительной влажности  $(50 + 5) \%$ .

Испытания проводят при давлении, указанном в нормативных или технических документах на материалы конкретных видов, в данном случае эта величина составляет 1 МПа. Перед проведением испытаний необходимо убедиться в том, что устройство не пропускает воду. Количество испытательных образцов составляет не менее 3 шт при условии, что в нормативных или технических документах на материалы конкретных видов не указано иное число образцов. Испытательные образцы (рис.2 а, б, в и рис.3б) имеют диаметр, равный внешнему диаметру диска с прорезями (130 мм). Образцы выдерживают перед испытанием при температуре  $(23 + 5) ^\circ\text{C}$  в течение не менее 6 ч. Далее, заполняют устройство (испытательную камеру), представленное на рис.3а и 4а, водой до переливания через край. После этого необходимо тщательно прочистить линию подачи воды.

Далее испытательные образцы помещают в устройство лицевой стороной вниз и протирают не контактирующую с водой сторону образца тканью или высушивают ее струей сжатого воздуха. Накрывают образец диском с прорезями, при этом одна из прорезей должна быть расположена параллельно продольному направлению испытываемого образца (рис.5).

В дальнейшем устанавливают крышку и постепенно затягивают ее так, чтобы образец

был плотно зажат в устройстве. Постепенно доводят давление воды до значения, приведенного в нормативных или технических документах на материалы конкретных видов (в данном случае 1 МПа), выдерживают при этом давлении в течение (24 + 1) ч, после чего инструментально или визуально оценивают водонепроницаемость испытуемого образца (отсутствие резкого падения давления или появление воды на не контактирующей с водой стороне образца).

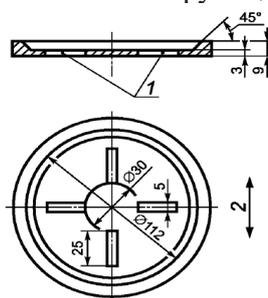


Рис. 5. Диск с прорезями для закрепления испытательных образцов: 1 – радиус закругления всех граней диска 0,5мм; 2 – продольное направление образца

Fig. 5. Disk with slots for fixing test samples: 1 –radius of rounding of all faces of the disk 0.5mm; 2 – longitudinal direction of the test sample

Материал считают водонепроницаемым (согласно ГОСТ EN 1928-2011), если все испытуемые образцы после испытания остались водонепроницаемыми.

**Обсуждение результатов.** В табл. 1 представлены результаты испытаний на определение водонепроницаемости одинарных сварных швов гидроизоляционных мембран.

Таблица 1. Результаты проведения испытаний сварных швов на водонепроницаемость  
Table 1. Results of testing welds for water resistance

Наименование характеристики Name characteristics	Наименование НД на метод испытаний/ Name of RD for test method	Ед. физ. величины/ Unit physical quantitie	Нормативные значения по СТО 72746455-3.4.3-2015 Standard values according to STO	Фактические значения и количество образцов/ Actual values and number of samples	
1	2	3	4	образец 1 (ПВХ LOGICBASEV-SL 2,0),3шт	образец 2 (ПВХ ECOBASE V-SL ,0),3шт
Водонепроницаемость, при 1 МПа в течение 24 ч./ Waterproof	ГОСТ EN 1928, метод В GOST EN 1928, method В	Визуально visually	Отсутствие следов проникновения воды/ No traces of water penetration	Следы проникновения воды отсутствуют/There are no signs of water penetration	

Специфика эксплуатации полимерных гидроизоляционных мембран в подземных конструкциях подразумевает под собой наличие в том числе и напорных вод [1-3, 16,20], от которых должна быть обеспечена защита. В частности, данные требования имеются в таких нормативных документах, как СП 250 (п.10.2.6., п.4.1.1), СП 104 (п.6.2.6.) и СП 28 (Приложение Н, таблица Н.1). Именно по этой причине швы полимерных гидроизоляционных мембран должны выдерживать значительное давление воды (с запасом), что и подтверждается проведенными испытаниями. Выполненные испытания наглядно демонстрируют водонепроницаемость одинарных сварных швов мембран LOGICBASE™ /ECOBASE™ марки V-SL, поскольку сварные швы выдерживают гидростатическое давление величиной 1 МПа (как и сам гидроизоляционный материал).

**Вывод.** По результатам исследования выявлено, что при давлении гидростатического напора 1 МПа в течение 24 часов с начала испытания при визуальном наблюдении в образцах отсутствуют следы проникновения воды, что говорит о полной водонепроницаемости швов и герметичности гидроизоляционных карт, выполненных подобным образом (при соблюдении всех правил сварки полимерных мембран). Согласно проведенным исследованиям сделан однозначный вывод, что одинарные швы ПВХ-мембран для инженерной гидроизоляции LOGICBASE™ / ECOBASE™

марок V-SL, сваренные ручным и автоматическим оборудованием, полностью герметичны при напоре воды 1 МПа, что примерно соответствует давлению воды на глубине 100м.

#### Библиографический список:

1. Шалимов, В.Н. Исследование расхода инъекционных составов в ремонтпригодных системах гидроизоляции фундаментов / В.Н. Шалимов, А.В. Цыбенко, И.Н. Гоглев // Умные композиты в строительстве. - 2022. - Т. 3. № 2. - С. 29-44.
2. Цыбенко, А.В. Многоосное растяжение полимерного рулонного гидроизоляционного материала. Определение прочности при разрыве // Фундаменты. - 2022. - № 3(9). - С.55-57.
3. Цыбенко А.В., Шалимов В.Н., Гоглев И.Н., Логинова С.А. Работа полимерного рулонного гидроизоляционного материала LOGICBASE™ на многоосное растяжение. Промышленное и гражданское строительство. - 2023. - № 3. - С. 74-79.
4. Аминтаев, Г.Ш. Сейсмическая безопасность – цель, сейсмостойкость сооружений - средство // Инженерные изыскания.- 2014. - № 2. - С. 48-53.
5. Пузанков Ю.И., Хорошев А.А., Чариков Г.Ю. Сейсмобезопасность зданий и сооружений. Электронный сетевой политематический журнал «Научные труды КубГТУ». - 2020. - № 8. - С. 123-133.
6. Бобров, И.М. Проектирование и строительство зданий и сооружений в сейсмических районах / И.М. Бобров, И.Н.Сегаев// Аллея науки. - 2018. - Т. 4. № 4 (20). - С. 230-233.
7. Расулов, М.А.Крестьянские (фермерские) хозяйства в Республике Дагестан // Вестник Института истории, археологии и этнографии. - 2016. - № 3 (47). - С.153-168.
8. Османьян, Р.Г.Агроэкологические ресурсы Дагестана и основные аспекты адаптивно-ландшафтного виноградарства // Экологическая безопасность в АПК. Реферативный журнал. - 2008. - № 3. - С.577.
9. Салихов, Ш.К.Микроэлементы в водах и грунтовых отложениях коллекторно-дренажной системы равнинной провинции Дагестана / Ш.К.Салихов, Р.П.Баширов // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. - 2013. - Т. 18. - № 4(1). - С.1368-1372.
10. Аллабергенова, Э.М.Некоторые гидрологические аспекты опустынивания Ногайского района республики Дагестан // Геология и геофизика Юга России. - 2019. - Т. 9. - № 4. - С.6-12.
11. Еременко Д.Б. Технический регламент как источник объективных требований к применяемым материалам (в порядке обсуждения)//Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 11. С. 57-62.
12. Травуш, В.И.О параметрической (PerformanceBased) модели нормирования и требованиях ГОСТ 27751-2014 «Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения»/ В.И. Травуш, Ю.С. Волков// БСТ: Бюллетень строительной техники.- 2018. - № 2 (1002). - С. 36-38.
13. Кловский, А.В.Особенности проектирования объектов повышенного уровня ответственности при пограничных значениях сейсмичности площадки строительства/ А.В. Кловский, О.В. Мареева // Природообустройство. - 2018. - № 3. - С. 63-69.
14. Лебедева, И.В.Проблемы нормирования надежности строительных конструкций и экспертная деятельность в области международной стандартизации // Строительная механика и расчет сооружений.- 2022. - № 2 (301). - С. 39-46.
15. Ершов Г.А., Семериков В.Н., Семериков Н.В., Тарасьев Ю.И. Нормативное обеспечение терминологии в области надежности. Хорош или плох ГОСТ 27751-2014? // Стандарты и качество. - 2023. - № 2. - С. 37-41.
16. Загородникова М.А.Оценка долговечности и химической стойкости ПВХ-мембран в конструкциях животноводческих комплексов / М.А.Загородникова, В.П.Ярцев, П.В.Монастырев // Вестник Тамбовского государственного технического университета. - 2016. - Т. 22. - № 4. - С.657-665.
17. Федосов, С.В. Выявление сульфатной и хлоридной коррозии бетона на полевой и лабораторной стадиях обследования строительных конструкций зданий и сооружений / С.В. Федосов, В.Н. Федосеев, С.А. Логинова, И.Н. Гоглев//БСТ: Бюллетень строительной техники. 2021. - № 10 (1046). - С. 29-31.
18. Логинова С.А., Гоглев И.Н. Индикаторные способы определения долговечности железобетонных конструкций при их обследовании//Строительство и техногенная безопасность. 2022. № S1. С.119-126.
19. Румянцева В.Е, Гоглев И.Н., Логинова С.А. Применение полевых и лабораторных методов определения карбонизации, хлоридной и сульфатной коррозии при обследовании строительных конструкций зданий и сооружений// Строительство и техногенная безопасность. 2019. - № 15(67). - С. 51-58.
20. Седова, А.А.Особенности применения систем гидроизоляции фундаментов, включающих мембраны //В сборнике: Серия "Строительство". Сборник статей магистрантов и аспирантов. В 2-х томах. Санкт-Петербург.- 2020. - С.385-398.

#### References

1. Shalimov V.N., Tsybenko A.V., Goglev I.N. Study of the consumption of injection compounds in repairable foundation waterproofing systems. *Smart composites in construction*. 2022; 3(2): 29-44.
2. Tsybenko, A.V. Multiaxial stretching of polymer roll waterproofing material. Determination of tensile strength. *Foundations*. 2022; 3(9):55-57.
3. Tsybenko A.V., V.N. Shalimov, I.N. Goglev, S.A. Loginova Performance of polymer roll waterproofing material

- LOGICBASE™ in multi-axial tension. *Industrial and civil construction*. 2023; 3: 74-79.
4. Amintaev, G.Sh. Seismic safety is the goal, seismic resistance of structures is the means. *Engineering surveys*. 2014; 2: 48-53.
  5. Puzankov, Yu.I. Seismic safety of buildings and structures/ Yu.I. Puzankov, A.A. Khoroshev, G.Yu. Charikov. *Electronic network polythematic journal "Scientific works of KubSTU"*. 2020;8:123-133.
  6. Bobrov, I.M. Design and construction of buildings and structures in seismic areas / I.M. Bobrov, I.N. Segaeв. *Science Alley*. 2018; 4 (20): 230-233.
  7. Rasulov, M.A. Peasant (farm) farms in the Republic of Dagestan. *Bulletin of the Institute of History, Archeology and Ethnography*. 2016; 3 (47):153-168.
  8. Osmanyаn, R.G. Agroecological resources of Dagestan and the main aspects of adaptive landscape viticulture. *Environmental safety in the agro-industrial complex. Abstract journal*. 2008; 3:577.
  9. Salikhov Sh.K., Bashirov R.R. Microelements in waters and ground sediments of the collector-drainage system of the plain province of Dagestan. *Bulletin of Tambov University. Series: Natural and technical sciences*. 2013;18 ( 4(1):1368-1372.
  10. Allabergenova, E.M. Some hydrological aspects of desertification in the Nogai region of the Republic of Dagestan. *Geology and Geophysics of the South of Russia*. 2019; 9(4):.6-12.
  11. Eremenko, D.B. Technical regulations as a source of objective requirements for the materials used (by way of discussion). *Industrial and civil construction*. 2015; 11: 57-62.
  12. Travush, V.I. About the parametric (PerformanceBased) standardization model and the requirements of GOST 27751-2014 "Reliability of building structures and foundations. Basic provisions"/ V.I. Travush, Yu.S. Volkov . *BST: Bulletin of construction equipment*. 2018; 2 (1002): 36-38.
  13. Klovisky A.V., Klovisky A.V., Mareeva O.V. Features of designing objects of an increased level of responsibility with boundary values of seismicity of the construction site. *Nature development*. 2018; 3:63-69.
  14. Lebedeva, I.V. Problems of standardization of reliability of building structures and expert activities in the field of international standardization. *Structural mechanics and design of structures*. 2022; 2 (301):39-46.
  15. Ershov G.A., V.N. Semerikov, N.V. Semerikov, Yu.I. Tarasyev. Regulatory support of terminology in the field of reliability. Is GOST 27751-2014 good or bad? *Standards and quality*. 2023; 2: 37-41.
  16. Zagorodnikova M.A., V.P. Yartsev, P.V. Monastirev. Assessment of durability and chemical resistance of PVC membranes in the structures of livestock complexes. *Bulletin of Tambov State Technical University*. 2016; 22( 4):657-665.
  17. Fedosov S.V., V.N. Fedoseev, S.A. Loginova, I.N. Goglev. Identification of sulfate and chloride corrosion of concrete at the field and laboratory stages of inspection of building structures of buildings and structures. *BST: Bulletin of Construction Technology*. 2021; 10 (1046): 29-31.
  18. Loginova S.A., Goglev I.N. Indicative methods for determining the durability of reinforced concrete structures during their inspection. *Construction and technogenic safety*. 2022; S1:119-126.
  19. Romyantseva V.E., Goglev I.N., Loginova S.A. Application of field and laboratory methods for determining carbonization, chloride and sulfate corrosion during the inspection of building structures of buildings and structures. *Construction and technogenic safety*. 2019; 15(67): 51-58.
  20. Sedova, A.A. Features of the use of foundation waterproofing systems that include membranes. In the collection: Series "Construction". Collection of articles by undergraduates and graduate students. In 2 volumes. St. Petersburg. 2020; 385-398.

**Сведения об авторах:**

Шалимов Владимир Николаевич, кандидат технических наук, руководитель технической службы направления «Полимерные мембраны и PIR»; prc@tn.ru

Цыбенко Алексей Васильевич, руководитель технической службы направления «Инженерная гидроизоляция»; prc@tn.ru

Гоглев Илья Николаевич, технический специалист направления «Инженерная гидроизоляция и PLANTER»; prc@tn.ru

Светлана Андреевна Логинова, кандидат технических наук, доцент; кафедра строительных конструкций; sl79066171227@yandex.ru

**Information about authors:**

Vladimir N. Shalimov, Cand. Sci. (Eng.), Head of the Technical service, Direction "Polymer membranes and PIR"; prc@tn.ru

Aleksey V. Tsybenko, Head of the Technical service, Direction "Engineering waterproofing"; prc@tn.ru

Ilya N. Goglev, Technical specialist, Direction "Engineering waterproofing and PLANTER"; prc@tn.ru

Svetlana A. Loginova, Cand. Sci. (Eng.), Assoc.Prof., Department of Building Structures; sl79066171227@yandex.ru

**Конфликт интересов/Conflict of interest.**

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

**Поступила в редакцию/Received 21.08.2023**

**Одобрена после рецензирования/ Revised 01.10.2023.**

**Принята в печать/Accepted for publication 01.10.2023.**

## 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); экспертное заключение о возможности опубликования в открытой печати (1 экз.); метаданные авторов: ФИО, место работы, ученое звание, должность (1 экз.);

### Правила оформления текста

Текст подготавливается в текстовом редакторе MicrosoftWord. Статья должна предусматривать разделы: «Введение», «Постановка задачи», «Методы исследования», «Обсуждение результатов», «Вывод». Объем непосредственно содержания статьи должен составлять не менее 9 -10 страниц машинописного текста. Формулы подготавливаются во встроенном редакторе формул MicrosoftWord или в редакторе MathType. Шрифтовое начертание обозначений в формулах, в таблицах и в основном тексте должно быть полностью идентичным. Ссылки на формулы и таблицы даются в круглых скобках, ссылки на использованные источники (литературу) - в квадратных скобках. Формат бумаги А4. Параметры страницы: поля - левое 3 см, верхнее и нижнее 2 см, правое 1,5 см; колонтитулы отсутствуют.

### Элементы заглавия публикуемого материала

- УДК
- Перечень авторов (разделяется запятыми, инициалы после фамилий, на русском и английском языке); выравнивание по центру.
- Название статьи (на русском и английском языке).
- Резюме (Abstract) – 200-250 слов, характеризующих содержание статьи (на русском и английском языке).
- Ключевые слова (keywords) 5-10 слов или словосочетаний, отражающих содержание статьи (на русском и английском языке).

Каждый элемент заглавия приводится, начиная с новой строки; выравнивание проводится по центру. **Основной текст** Шрифт TimesNewRoman 12 pt, выравнивание по ширине, первая строка с отступом 1,25 см, межстрочный интервал - 1.

### Библиографический список

В статье указывается строка с текстом «**Библиографический список**». Библиографический список на русском языке выполняется по ГОСТ Р 7.0.5 -2008. Библиографический список должен составлять не менее 15 наименований источников литературы, среди которых от 30-70 % ссылок на иностранные источники. Ссылки на неопубликованные работы не допускаются. Обязательно цитирование современных работ, изданных по тематике статьи за последние 5 лет. Доля ссылок на статьи авторов рукописи, изданных ранее, не должна превышать 20% от общего количества ссылок. Библиографический список обязательно должен быть переведен на английский язык. «References» должен быть составлен по стандарту «Ванкувер». Ссылки на материалы, размещенные на электронных носителях, следует допускать в крайнем случае. Редакция оставляет за собой право потребовать от автора замены ссылки, если на момент обработки статьи по указанному адресу материал будет отсутствовать.

### Справка об авторах

Включает для каждого автора фамилию, имя, отчество (полностью), ученую или академическую степень, ученое звание, ORCID, название и полный адрес места работы. Обязательно указывается адрес электронной почты. Сведения представляются на русском и английском языках.

### Верстка формул

Формулы подготавливаются во встроенном редакторе формул MicrosoftWord или в редакторе MathType; нумеруются только те формулы, на которые есть ссылки в тексте статьи; использование при нумерации букв и других символов не допускается. Выписанные в отдельную строку формулы выравниваются по середине строки, номер заключается в круглые скобки и выравнивается по правому краю текста. Все впервые встречающиеся в формуле обозначения должны быть расшифрованы сразу после формулы.

### Верстка рисунков

Рисунки, представляющие собой графики, схемы и т. п., должны быть выполнены в графических векторных редакторах (встроенный редактор MicrosoftWord, CorelDraw, MicrosoftVisio и т. п.). Использование точечных форматов (.bmp, .jpeg, .tif, .html) допустимо только для рисунков, представление которых в векторных форматах невозможно (фотографии, копии экрана монитора и т. п.). Название рисунка указывается на русском и английском языках.

### Верстка таблиц

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.

Редколлегия 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 редколлекцией окончательного текста статьи.

Адрес редакционного совета: 367026, РД, г. Махачкала, пр. И. Шамиля, 70, ФГБОУ ВО «ДГТУ», Учебно-лекционный корпус 2, редакция журнала «Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки». Технические вопросы можно выяснить по электронному адресу: [aidaesetova@rambler.ru](mailto:aidaesetova@rambler.ru) и по телефону 8(8722)62-39-64, +79280504268

#### FORMATTING REQUIREMENTS FOR PAPERS

Electronic copies are used when laying out the journal. Computer processing is used for line and halftone (grayscale) graphics. The journal is produced by offset printing technology. Therefore, the following should be submitted to the editor: a printout of the manuscript (2 copies.); the printout should be a hard copy of the electronic article file; electronic copy (e-mail is acceptable); an expert opinion supporting the article's suitability for publication (1 copy); Information about authors: Name, place of work, academic rank, position.

#### Guidance for the preparation of texts

The text should be prepared in Microsoft Word. The article must include sections entitled: “**Introduction**”, “**Background**”, “**Methods**”, “**Results and Discussion**”, “**Conclusion**”. The article itself is supposed to comprise at least 9-10 if typewritten pages. Formulae should be prepared in Microsoft Word's built-in equation editor or MathType. Font symbols used in formulae, tables and in the main text must be completely identical. References to formulae and tables are given in round brackets; references to the sources referred to (literature) – in square brackets.

Paper size – A4. Page setup: margins – left 3 cm, top and bottom – 2 cm, right – 1.5 cm; no headers or footers.

#### Elements of the title of the published material

- UDC / LBC
- List of authors (separated by commas; initials after surnames; in Russian and English); alignment *right*.
- Title of the article (in Russian and English).
- Abstract – 200-250 words or characters describing the content of the article (in Russian and English).
- Keywords – 5-10 words or phrases that reflect the content of the article (in Russian and English).

Each title element should start on a new line; aligned centre.

**Body text.** Font TimesNewRoman 12 pt, full justification, first line with 1.25 cm indentation, line spacing – 1.

#### Bibliography

The bibliography list should be entitled References. References in Russian prepared according to GOST R 7.0.5 -2008.

The reference list is considered to include at least 20 names of literature sources, including 30–70% of references to foreign sources. References to unpublished works are not permitted. Only recent works on the subject of the article published within the past 5 years should be cited. The proportion of references to articles previously published by the authors should not exceed 20% of the total number of references. The bibliography must be translated into English. “References” should be drawn up according to the “Vancouver” standard. Please indicate your chosen standard when formulating the bibliography. Links to material on electronic media shall be allowed as a last resort. The editors reserve the right to require a replacement reference from the author if an item is absent at a specified address at the time of processing of the article.

#### Information about authors

For each author, the following information should be provided: first name, middle name (or patronymic) and last name, scientific or academic degree, academic title, brief academic biography (no more than 5-6 lines), name and full address of place of work. The specification of an email address is mandatory.

#### Composition of formulas

Formulas should be prepared in the built MicrosoftWord equation editor or MathType Editor; only those formulas that are referenced in the text should be numbered; the use of letters or other characters is not permitted when enumerating equations. Formulas written out on a separate line are aligned to the middle of the line; their respective numbers shall be in parentheses and right-aligned. All symbols occurring in the formula for the first time must be decoded immediately after the formula.

#### Layout of figures

Drawings, consisting of graphs, charts, etc. should be prepared in graphic vector editors (the internal editor of MicrosoftWord, CorelDraw, MicrosoftVisio etc.). The use of bitmap formats (.bmp, .jpeg, .tif) is only permissible for graphics whose presentation is not possible in vector formats (photos, screenshots, etc.).

#### Layout of tables

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 Shamiya Ave., Makhachkala 367026, Daghestan, Russia. Daghestan State Technical University, Tutorial-Lecture Building 2, Editorial Board «Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences». Technical questions can be clarified by e-mail: [aidaesetova@rambler.ru](mailto:aidaesetova@rambler.ru) or by telephone 8 (8722) 62-39-64; +79280504268.

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**

**Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation**



**ВЕСТНИК**

**ДАГЕСТАНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА.  
ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ**

Махачкала, Том 50– №4 – 2023.

**HERALD**

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

Makhachkala, Volume 50, No.4. 2023.

**Верстка: Красикова А.В., Бирюкова И.А.**

**Перевод: Эсетова А.М.**

**Адрес редакции:**

367026, 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., Biryukova I.A.**

**Translation: Esetova A.M.**

**Editorial and Publisher address: 70 I. Shamil Ave., Makhachkala 367026, Daghestan, Russia.**

FSBEE HE «DSTU»

Tel./fax (8722)623715

(8722)623964

**«БЕСПЛАТНО»**

Сдано в печать 25.12.2023г. Подписано в печать 30.12.2023г.

Формат 60x84 1/8. Гарнитура «Times». Бумага офсетная

Тираж 500. Усл. п.л. 24.65 Уч. изд.л. 17,68

Заказ № 301223

Отпечатано в типографии ИП Копыльцов П.И.

394052, Воронежская область, г. Воронеж, ул. Маршала Неделина, д. 27, кв. 56.

Тел.: 89507656959. E-mail: [Kopyltsow\\_Pavel@mail.ru](mailto:Kopyltsow_Pavel@mail.ru)