

ISSN (Print) 2073-6185

ISSN (On-line) 2542-095X

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



Том 50, № 1, 2023.

ВЕСТНИК

**ДАГЕСТАНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА.**

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Volume 50, No.1, 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).

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).

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.

© Founder and Publisher Daghestan State Technical University, 2023.

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, № 1, 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.

Кузюзов 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 жилищно - 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

Сопредседатели:

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

Кузюзов 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)

2.1.10. Экологическая безопасность строительства и городского хозяйства (технические науки)

Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. Том 50, № 1
Махачкала, 2023. – 248с.

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

СОДЕРЖАНИЕ

Энергетика и электротехника	6
А.Ю. Баранов, Е.С. Середенко, Т.А. Малышева, Ю.А. Кравченко. Моделирование регазификационных и рециркуляционных процессов при транспортировке сжиженного природного газа	6
О.В. Евдулов, И.Ю. Аминова, Г.И. Аминов, С.Г. Гасанова, П.Н. Суракатова. Натурные исследования термоэлектрической системы для теплового воздействия на передний отрезок глазного яблока человека.....	15
Р.А. Жлобо, М.В. Шамаров, В.И. Алёшин. Моделирование процесса холодильного воздействия на пищевые продукты.....	24
А.И. Семиляк, Т.Э. Саркаров, Д.В. Евдулов, К.К. Назаров. Оптимизация термоэлектрических систем контроля температуры	33
В.А. Пронин, А.В. Кованов, В.А. Цветков, Е.Н. Михайлова, П.А.Белов. К вопросу оптимизации рабочих характеристик спирального компрессора в составе бустерной холодильной машины на CO ₂ с целью повышения ее эффективности	42
Информационные технологии и телекоммуникации	53
М.В. Бабичева, И.А. Третьяков. Применение методов машинного обучения для автоматизированного обнаружения сетевых вторжений	53
В.А. Воеводин, В.С. Черняев, Д.С. Буренок, И.В. Виноградов. Методика оценки защищённости автоматизи-рованной системы управления критической информационной инфраструктуры от DDoS-атак на основе имитационного моделирования методом Монте-Карло	62
Д.А.Гура, О.С.Болтовнина. Применение существующих алгоритмов по классификации и кластеризации точек лазерного отражения (k-Means, DBSCAN, SVM) для решения задач территориального планирования	75
А.О. Ефимов, В.С. Наседкина, А.Д. Попов, Е.А. Рогозин, В.Р. Романова. Анализ особенностей функционирования защищенных автоматизированных систем органов внутренних дел в условиях воздействия угроз несанкционированного доступа	81
И.А. Магомедов, М.Н. Хидивов, А.И. Магомедов. Принципы построения многофункционального интеллектуального счётчика электрической энергии с расширенными коммуникационными и функциональными возможностями.....	89
Л.И. Малявкина, А.Г. Савина, Д.А. Савин. Проблемы информационно-технологического обеспечения реализации BIM-концепции.....	99
А.И. Мифтахова, Э.И. Янгиров, Е.И. Карасева, А.И. Янгиров, Е.Ю. Никулина, И.Г.Дровникова. Разработка программно-технического решения для выявления трендов спроса на товары	114
С.И. Носков, Е.С. Попов, С.П. Середкин, В.В. Тирских, В.Д. Торопов. Вариантное регрессионное моделирование производства электроэнергии в Российской Федерации.....	123
А.В. Рыбак, Р.М. Данилов. Совершенствование управления кадровым обеспечением органов внутренних дел на основе процедур системного анализа	130
Ф.Б.Тебueva, В.О. Антонов, М.Ю. Кабиняков, Н.Ю. Свистунов. Алгоритм мониторинга динамической зоны распространения лесных пожаров группой беспилотных летательных аппаратов.....	140
В.В. Ткач, А.А. Шевцов. Виртуальный испытательный стенд для компьютерного проектирования барабанных сушилок по кинетическим закономерностям процесса сушки	152
Строительство и архитектура	161
А.Я. Джанкулаев, О.М. Шогенов, З.Р. Лихов, А.М.Казиев, И.А.Блянихов. Расчет несущей способности изгибаемых плит с учетом диаграмм деформирования бетона	161
Х.Р. Зайнулабидова, У.Д. Тотурбиева, А.М. Джамалудинов. О моделях колебаний грунтов при сильных землетрясениях	167
Д.Ф. Карпов, М.В. Павлов, А.Г. Гудков. Выявление скрытых дефектов тепловой защиты зданий и определение некоторых термических свойств конструкционных строительных материалов неразрушающим методом тепловидения.....	174
А.Ю. Ким, С.В. Полников, М.Ф. Амоян. Новые виды мембранно-стержневых и мембранно-пневматических сооружений и усовершенствованные методы их расчета	185
О.Н. Киндеев, М.А. Высоцкая, А.В. Курлыкина. Наполненные битумные композиции в строительной индустрии	194
Р.В. Муканов, Ю.А. Аляутдинова, С.П. Стрелков. Исследование процессов горения жидкого топлива в электростатическом поле	207
Т.А. Хежев, Г.Н. Хаджишалапов, А.В. Журтов, Ф.М. Шогенова, А.В. Калажоков. Строительно-технические свойства вермикулитобетона и фибровермикулитобетона с вулканической пемзой при воздействии повышенных температур.....	215
В.Н. Шалимов, А.В. Цыбенко, И.Н. Гоглев, С.А. Логинова. Исследование работы ПВХ-мембран для инженерной гидроизоляции в условиях повышенной сейсмичности	229
А.К. Юсупов, Х.М. Муселемов, Р.И. Вишталов. Пространственные большепролетные конструкции	238
Требования к оформлению статей	245

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 . 1 , 2 0 2 3 .

Editor-in-Chief: Rasul M. Aliev, Dr. Sci. (Eng.), Professor,, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; https://orcid.org/0000-0002-3061-4121 Deputy Editor: Aida M. Esetova, Dr. Sci. (Econom.), Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; https://orcid.org/0000-0003-1093-5507 Editorial Board: Scientific rubric «Energy and Electrical Engineering» Executive editor: Oleg V. Evdulov, Dr. Sci. (Eng.), Aassoc. Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; Ganapi J. Akhmedov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; Alexander P. Ivanov, Dr. Sci. (Mathematics and Physics), Moscow Institute of Physics and Technology (State University), Dolgoprudny, Russia; Nicholay I. Kargin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Vice Rector, Deputy Director of the Institute for Functional Nuclear Electronics, National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia; Dmitry N. Kobzareno, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences Institute of Geothermal Problems, Daghestan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Makhachkala, Russia; Alexander A. Krugljakow, Dr. Sci. (Eng.), Professor, General Director Wissenschaftliche Beratung und Handelsvertretung, Vladimir M. Kutuzov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, President St. Petersburg Electrotechnical University «LETI», Saint-Petersburg, Russia; Magomed Kh. Magomedov, Dr. Sci. (Mathematics and Physics), General Director, "SAUNO" ltd. Moscow, Russia; Gadzhimet K. Safaraliyev, Dr. Sci. (Mathematics and Physics), Professor, Scientific Director of the «Microelectronics and Nanotechnology» Research Institute, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; Alexander B. Sulin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Corresponding member, MAX, Institute of Industrial and Marine Medicine of Federal Medical and Biological Agency, St. Petersburg, Russia; Scientific rubric «Information Technology and Telecommunications» Executive editor: 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. Scientific rubric «Building and architecture» Executive editor: Gadzhimurad N.Khadzhishalapov, 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; Muhtaritdin 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 NIIZHB, JSC «SIC Construction», Moscow, Russia; Vladimir G. Kazachek, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Senior researcher, Ataev Institute of Dwelling - NIPTIS Director of Mobile diagnostics in construction, Minsk, Republic of Belarus; Khasan N. Mazhiev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Millionshchikov Grozny State Oil Technical University, Grozny, Russia; Gregory V. Nesvetaev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of Construction Technologies Department, Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia; Editorial council Chairman of the editorial council: Boris A.Yakimovich, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia. The co-chairs of the editorial council: Konstantin M. Ivanov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Rector, Ustinov Baltic State Technical University «VOENMECH», Saint-Petersburg, Russia; Vladimir M. Kutuzov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, President St. Petersburg Electrotechnical University «LETI», Saint-Petersburg, Russia; Members of the Editorial Board: Mustafa B.-O. Babanly, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Rector, Azerbaijan State University of Oil and Industry, Baku, Azerbaijan; Islam I. Djanzakov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Corresponding member, SRA RK, Academician of MANEB, Atyrau, Republic of Kazakhstan; Sergey I. Timoshin, Dr. Sci. (Mathematics and Physics), Academician of the Belarusian Academy of Engineering, Professor, Rector, Sukhoi Gomel State Technical University, Gomel, Republic of Belarus;	Research areas 2.4.8. Machines and devices, processes of refrigeration and cryogenic equipment (Technical Sciences), 2.3.1. System analysis, management and information processing (Technical Sciences), 2.3.3. Automation and management of technological processes and production (Technical Sciences), 2.3.4. Management in organizational systems (Technical Sciences), 1.2.2. Mathematical modeling, numerical methods and program complexes (Technical Sciences), 2.3.6. Methods and systems for information security, information security(Technical Sciences), 2.3.7.Computer modeling and design automation (Technical sciences) 2.1.3.Heat supply, ventilation, air conditioning, gas supply and lighting (Technical Sciences), 2.1.5. Building materials and products (Technical Sciences), 2.1.9.Construction mechanics (Technical Sciences), 2.1.10. Ecological safety of construction and urban economy (Technical Sciences), Herald of Daghestan State Technical University. Technical Science.Vol. 50, No.1 Makhachkala, 2023–248p. Published by Decision of the Academic Council Daghestan State Technical University Edition and Publisher Address: 70 I. Shamil Ave., Makhachkala, the Republic of Daghestan 367026, Russia. Daghestan State Technical University Tel./fax (8722)623715 (8722)623964
--	---

CONTENTS

Energy and Electrical Engineering	6
A.Yu. Baranov, E.S. Seredenko, T.A. Malysheva, Yu.A. Kravchenko. Modeling of regasification and recirculation processes during the transportation of liquefied natural gas	6
O.V. Evdulov, I.Yu. Aminova, G.I. Aminov, S.G. Gasanova, P.N. Surakatova. Field studies of a thermoelectric system for thermal action on the anterior segment of the human eyeball	15
R.A. Zhlobo, M.V. Shamarov, V.I. Alyoshin. Modeling the process of refrigeration effects on food products	24
A.I. Semilyak, T.E. Sarkarov, D.V. Evdulov, K.K. Nazarov. Optimization of thermoelectric temperature control systems	33
V.A. Pronin, A.V. Kovanov, V.A. Tsvetkov, E.N. Mikhailova, P.A. Belov. To the issue of optimising the performance of a scroll compressor as part of a CO ₂ booster refrigerating machine in order to increase its efficiency	42
Information Technology and Telecommunications	53
M.V. Babicheva, I.A. Tretyakov. Application of machine learning methods for automated detection of network intrusions	53
V.A. Voevodin, V.S. Chernyaev, D.S. Burenok, I.V. Vinogradov. Assessment methodology for security of an auto-mated control system of critical information infrastructure against DDoS attacks based on Monte Carlo simulation	62
D.A. Gura, O.S. Boltovnina. Application of existing algorithms for classification and clustering of laser reflection points (k-Means, DBSCAN, SVM) to solve territorial planning problems	75
A.O. Efimov, V.S. Nasedkina, A.D. Popov, E.A. Rogozin, V.R. Romanova. Analysis features of the functioning of protected automated systems of internal affairs bodies under the influence of threats of unauthorized access	81
I.A. Magomedov, M.N. Khidivov, A.I. Magomedov. Principles of construction of a multifunctional intelligent electric energy meter with advanced communication and functional capabilities	89
L.I. Malyavkina, A.G. Savina, D.A. Savin. Problems of information technology support for implementation BIM concepts	99
A.I. Miftakhova, E.I. Yangirov, E.I. Karaseva, A.I. Yangirov, E.Yu. Nikulina, I.G. Drovnikova. Development of a software and hardware solution to identify trends in demand for goods.	114
S.I. Noskov, E.S. Popov, S.P. Seredkin, V.V. Tirskikh, V.D. Toropov. Variant regression modeling of electricity production in the Russian Federation	123
A.V. Rybak, R.M. Danilov. Improvement of personnel management of internal affairs bodies on the basis of system analysis procedures	130
F.B. Tebueva, V.O. Antonov, M.Yu. Kabinyakov, N.Yu. Svistunov. Algorithm for monitoring the dynamic zone of forest fires by a group of unmanned aircraft	140
V.V. Tkach, A.A. Shevtsov. Virtual test bench for computer-aided design of drum dryers based on kinetic laws of the drying process	152
Building and Architecture	161
A.Y. Dzhanakulaev, O.M. Shogenov, Z.R. Likhov, A.M. Kaziev, I.A. Blyanihov. Calculation of the load-bearing capacity of the bent plates taking into account the diagrams of concrete deformation.	161
H.R. Zainulabidova, U.D. Toturbieva, A.M. Jamaludinov. On models of ground vibrations in strong earthquakes	167
D.F. Karpov, M.V. Pavlov, A.G. Gudkov. Detection of hidden defects of thermal protection of buildings and determination of some thermal properties of structural building materials by Non-destructive Thermal Imaging method	174
A.Yu. Kim, S.V. Polnikov, M.F. Amoyan. New types of membrane-rod and membrane-pneumatic structures and improved methods for their calculation	185
O.H. Kindeev, M.A. Vysotskaya, A.V. Kurlykina. Filled bituminous compositions in the construction industry ...	194
R.V. Mukanov, Yu.A. Alyautdinova, S.P. Strelkov. Investigation of liquid fuel combustion processes in an electrostatic field	207
T.A. Khezhev, G.N. Khadzhishalapov, A.V. Zhurov, F.M. Shogenova, A.V. Kalazhokov. Construction and technical properties of vermiculite concrete and fibro vermiculite concrete with volcanic pumice under the influence of elevated temperatures	215
V.N. Shalimov, A.V. Tsybenko, I.N. Goglev, S.A. Loginova. Study of work of PVC membranes for engineering waterproofing under increased seismic conditions	229
A.K. Yusupov, Kh.M. Muselemov, R.I. Vishtalov. Spatial large-span structures	238
Formatting requirements for papers	245

ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА
ENERGY AND ELECTRICAL ENGINEERING

УДК 621.642.86

DOI: 10.21822/2073-6185-2023-50-1-6-14

Оригинальная статья /Original Paper

**Моделирование регазификационных и рециркуляционных процессов
при транспортировке сжиженного природного газа**

А.Ю. Баранов^{1,2}, Е.С. Середенко¹, Т.А. Малышева¹, Ю.А. Кравченко¹

¹ Университет ИТМО,

¹197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский просп., 49, Россия,

²ООО «НПП «КРИОН»,

²197349, г. Санкт-Петербург, Макулатурный проезд 4, литер А, пом. 120-121, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является моделирование и анализ технологических процессов, протекающих на перевалочном терминале сжиженного природного газа. **Метод.** Исследование основано на методах термодинамического анализа, натурного и вычислительного моделирования процессов и объектов холодильной и криогенной техники с целью поиска оптимальных решений по экономичности, надежности и ресурсу низкотемпературных установок, машин и аппаратов. **Результат.** В статье описан алгоритм работы перевалочного СПГ-терминала и предложен математический аппарат для моделирования протекающих в нем технологических процессов. Представлена информация о причинах образования паров СПГ (Boil-off gas (BOG)) в процессе его транспортирования и перегрузки, рассмотрены методы утилизации избыточных паров СПГ. **Вывод.** Для поддержания криогенной температуры разгрузочных рукавов представлена линия рециркуляции СПГ (рециркуляционные трубопроводы).

Ключевые слова: рециркуляция, сжиженный природный газ (СПГ); танкеры СПГ, перевалочный терминал СПГ, отпарной газ, пары СПГ; утилизация паров СПГ

Для цитирования: А.Ю. Баранов, Е.С. Середенко, Т.А. Малышева, Ю.А. Кравченко. Моделирование регазификационных и рециркуляционных процессов при транспортировке сжиженного природного газа. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023; 50 (1):6-14. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-1-6-14

**Modeling of regasification and recirculation processes during the transportation
of liquefied natural gas**

A.Yu. Baranov^{1,2}, E.S. Seredenko¹, T.A. Malysheva¹, Yu.A. Kravchenko¹

¹ITMO University,

¹49 Kronverksky Ave., Saint Petersburg 197101, Russia,

²LLC Research and Production Company KRION,

²4 Makulaturnyy passage, Letter A, room. 120-121, Saint Petersburg 197349, Russia

Abstract. Objective. The purpose of the research is modeling and analysis of technological processes occurring at the transshipment terminal of liquefied natural gas. **Method.** The study is based on the methods of thermodynamic analysis, full-scale and computational modeling of processes and objects of refrigeration and cryogenic equipment in order to find optimal solutions in terms of efficiency, reliability and service life of low-temperature installations, machines and apparatus. **Result.** The article describes the operation algorithm of an LNG transshipment terminal and proposes a mathematical apparatus for modeling the technological processes occurring in it. Information about the causes of the formation of LNG vapors (Boil-off gas (BOG)) during its transportation and reloading is presented, methods for utilizing excess LNG vapors are considered. **Conclusion.** To maintain the cryogenic temperature of the unloading arms, an LNG recirculation line (recirculation pipelines) is provided.

Keywords: recycling, liquefied natural gas (LNG); LNG tankers, LNG transshipment terminal, boil-off gas, LNG vapors; LNG vapor recovery

For citation: A.Yu. Baranov, E.S. Seredenko, T.A. Malysheva, Yu.A. Kravchenko. Modeling of regasification and recirculation processes during the transportation of liquefied natural gas. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science. 2023; 50(1):6-14. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-1-6-14

Введение. Мировой спрос на сжиженный природный газ (СПГ) стремительно растет. По данным [1] за 2019 год Россия экспортировала 28,9 млн. тонн СПГ. Основные объемы СПГ экспортировались в Европу (15,4 млн. тонн) и Восточную Азию (11,7 млн. тонн). Планируется, что к 2035 году за счет реализации ряда инвестпроектов производство СПГ превысит 80 млн. тонн в год, а доля России в мировом производстве составит 15-20%.

На сегодняшний день в России действуют два крупнотоннажных завода по производству СПГ: «Сахалин-2» и «Ямал СПГ». На стадии реализации находятся проекты «Арктик СПГ 2», «Балтийский СПГ» совместно с комплексом по переработке этансодержащего газа, проектируется завод «Владивосток-СПГ».

Основное направление развития экономики Арктического региона России связано с геологоразведкой и добычей углеводородов. Компания НОВАТЭК (проекты «Ямал СПГ» и «Арктик СПГ 2») предпринимает все необходимые шаги по освоению этого направления и предусматривает рост производства СПГ в Арктическом регионе к 2030 году до уровня 70 млн. т в год [2]. Основные преимущества использования СПГ для доставки сжиженного природного газа с месторождений Российской Арктики (полуострова Ямал и Гыданский) на европейские и азиатские рынки заключаются в наименьшей стоимости перевозки СПГ и в сокращении сроков доставки по сравнению с альтернативными маршрутами [3].

Постановка задачи. Схема транспортировки по Суэцкому каналу предусматривает доставку СПГ на перегрузочный терминал в Мурманске танкерами ледового класса с последующей перевалкой на СПГ-танкеры обычного типа и отгрузку в азиатский регион. При транспортировке СПГ в восточном направлении по Северному морскому пути предполагается перевалка СПГ с танкеров ледового класса на танкеры обычного типа на Камчатке. Перегрузочные терминалы в Мурманске и на Камчатке построит «НОВАТЭК», их ввод в эксплуатацию запланирован на 2022-2023 год [4,5]. Каждый из терминалов включает плавучее хранилище СПГ двумя точками перевалки «борт-в-борт», мощность каждого терминала - 20 млн. тонн в год (табл. 1).

Таблица 1. Технические характеристики перегрузочных терминалов

Table 1. Specifications of transshipment terminals

Параметры / Options	Регион расположения терминала/ Terminal location region	
	Мурманск	Камчатка
Пропускная способность Bandwidth	20 млн. тонн/год	20 млн. тонн/год
Местонахождение Location	Губа Ура на берегу Баренцева моря (40 км от г. Мурманск, 1000 морских миль от Сабетты)	Бухта Бечевинская (100 км от г. Петропавловск-Камчатский, 4000 морских миль от Сабетты)
Объем хранилища Storage capacity	2 плавучих хранилища СПГ объемом V=360 тыс. м ³	2 плавучих хранилища СПГ объемом V=360 тыс. м ³
Условия поставок Delivery conditions	Возможна продажа на условиях FOB*	Возможна продажа на условиях FOB*

*Условия FOB (англ. Free On Board) предусматривают, что продавец обязан доставить товар в порт и погрузить на указанное покупателем судно, расходы по доставке товара на борт судна возлагаются на продавца.

Транспортировка СПГ по Северному морскому пути требует использования танкеров-газовозов ледокольного класса типа Arc7. Подобные танкеры уже применяются в России, это суда длиной около 300 м, вместимостью 172 600 куб. м СПГ.

Специально для проекта «Ямал СПГ» спроектированы и построены 15 СПГ-танкеров ледового класса Arc7, способные осуществлять навигацию без ледокольной проводки по Северному морскому пути. Наличие такого уникального флота позволит осуществлять транспортировку СПГ в порты Азиатско-Тихоокеанского региона круглогодично. За 2020 год с завода «Ямал СПГ» было отгружено 255 танкерных партий СПГ (18,6 млн. тонн) [2].

Дополнительным преимуществом транспортировки СПГ по Северному морскому пути является возможность бункеровки судов, перевозящих сжиженный природный газ. В условиях ужесточения требований к судовому топливу и возможного запрета Международной морской организации на использование мазута в Арктике, использование СПГ в качестве судового топлива может стать вполне оправданной альтернативой [5].

Методы исследования. Существенное сокращение расстояния и времени транспортировки по СМП обеспечит снижение объемов образования паров сжиженного природного газа (Boil-off gas (BOG)).

Пары СПГ образуются за счет разницы температур между СПГ и окружающей средой вследствие подвода теплоты из окружающей среды через изоляцию стенок танка. Как правило, избыточные пары сжиженного природного газа собираются с помощью системы рекуперации паров, повторно сжижаются и возвращаются в сжиженном виде в грузовые танки. При отсутствии на танкере системы повторного сжижения природного газа, избыточные пары СПГ сжигают на факельной установке [6].

В зависимости от двигательной установки судна-газовоза, избыточные пары СПГ могут использоваться в качестве судового топлива.

Поскольку пары сжиженного природного газа являются ценным побочным продуктом СПГ, в мировой практике все чаще применяют двухтопливные двигательные установки, способные работать на газе, а тяжелый мазут или судовое дизельное топливо при этом используются в качестве резервного топлива [7].

Танкеры-газовозы ледового класса типа Arc7, предназначенные для перевозки СПГ по Северному морскому пути, оснащены двухтопливными двигателями Wärtsilä. Скорость парообразования для таких танкеров составляет 0,125% - 0,13% в день от объема СПГ в грузовом танке [8]. Для танков применяется специальная технология теплоизоляции - NO96-GW, за счет чего во время морских рейсов образуется меньше паров СПГ.

При вместимости танкера 170 000 м³ СПГ образуется порядка 170-255 м³ паров СПГ ежедневно. Испаряющийся газ составляет около 80-90% энергии, необходимой танкеру СПГ при его полной мощности в груженом рейсе, и около 40-50% в балластном рейсе [9]. Для продолжения работы танкеру потребуется дополнительное количество топлива или паров СПГ. В таком случае могут применяться форсированные испарители, позволяющие испарять дополнительное количество СПГ. Следует отметить, что во время морских перевозок вследствие постоянного испарения СПГ возрастает и теплота сгорания его паров. Со временем этот факт может снизить необходимость принудительного испарения дополнительного количества СПГ.

На перегрузочных терминалах в Мурманске и на Камчатке СПГ перегружается с танкеров ледового класса Arc7 на танкеры обычного типа для дальнейшей его транспортировки в азиатские и европейские порты.

Поскольку поставки и отгрузки продукта могут носить неравномерный характер, с целью снижения продолжительности простоев судов-газовозов в ожидании разгрузки или погрузки СПГ предусматривается возможность перегрузки СПГ с судна на судно по схеме «борт в борт» без промежуточного хранения на плавучих хранилищах газа (ПХГ).

При погрузочно/разгрузочных операциях интенсивность парообразования может кратковременно возрастать в 1,5-2 раза. Основные причины парообразования в процессе

погрузки/разгрузки танкера представлены в табл. 2 [10]. Избыточные пары СПГ отводятся в специальный рукав на терминале и далее на береговую систему повторного сжижения природного газа или могут сжигаться на факельной установке.

Таблица 2. Основные причины парообразования в процессе погрузки/разгрузки танкера
Table 2. The main causes of vaporization during loading / unloading of a tanker

	Наименование технологических операций Name of technological operations
Парообразование в процессе погрузки танкера Vaporization in the process of loading a tanker	Возврат паров из танков судна; Теплопритоки от двигателей насосов терминала; Теплопритоки из окружающей среды к трубопроводам и оборудованию СПГ; Охлаждение судовой грузовой магистрали и погрузочных рукавов; Охлаждение причальной линии (если загрузка непрерывная); Смешение загруженного СПГ с остатками от предыдущей партии СПГ (пяткой); Охлаждение танков судна.
Парообразование в процессе разгрузки танкера Steam generation during tanker unloading	Возврат паров в танки судна; Теплопритоки от двигателей насосов судна; Теплопритоки из окружающей среды к трубопроводам и оборудованию СПГ; Рабочее давление в танке судна выше, чем в резервуаре для хранения СПГ; Охлаждение судового коллектора и разгрузочных рукавов; Охлаждение причальной линии (если разгрузка непрерывная) Смешение выгруженного СПГ с остатками от предыдущей партии СПГ

Образующиеся при транспортировке и перегрузке пары СПГ возможно реализовывать по местной газотранспортной сети потребителям. При строительстве собственной газотранспортной инфраструктуры, снабжение потребителей Камчатского края и Мурманской области регазифицированным сжиженным природным газом (парами СПГ) целесообразно и позволит покрыть операционные затраты перегрузочных терминалов. Подобная практика уже применяется в странах Западной Европы, где образующийся при перевалке регазифицированный сжиженный природный газ используется для покрытия нагрузок в тепловой энергии близлежащих населенных пунктов [2].

Потребность в СПГ на Камчатке оценивается в 600 тыс. т/год СПГ (около 1 млрд. м³/год газа). Только газовых выбросов терминала вместимостью 360 тыс. м³ СПГ будет недостаточно для полного покрытия дефицита газоснабжения Камчатского края. Для покрытия пиков потребления газа в зимний период потребуется строительство хранилищ СПГ общим объемом около 600-800 тыс. м³. Правительством Камчатского края рассматриваются 2 варианта газификации региона: строительство регазификационного терминала мощностью 600 тыс. т/год СПГ (около 1 млрд м³/год газа) в Авачинской бухте или строительство магистрального газопровода от перегрузочного терминала НОВАТЭКа до г. Петропавловск-Камчатский.

Со строительством СПГ-терминала в Мурманской области региональное руководство связывает надежды на замещение нефтяных топлив и угля. Можно предположить, что расчет идет также на использование газовых выбросов, образующихся при хранении и перегрузке СПГ. Использование СПГ для газификации Мурманской области позволит заместить до 177 тыс. т нефтяных топлив и более 1 тыс. т угля на объектах теплоснабжения Мурманской области [5]. Для замещения используемого топлива потребуется около 150 тыс. т СПГ.

Обсуждение результатов. Физическая модель регазификационного терминала СПГ. Регазификационные терминалы предназначены для приема СПГ с танкеров-

газовозов и подготовки природного газа к использованию. На регазификационных терминалах СПГ хранится в изотермических резервуарах и по мере необходимости переводится в газообразное состояние. Перевод СПГ в газообразное состояние происходит в системе испарения при помощи нагрева. В качестве прямого теплоносителя обычно используется морская вода, в качестве промежуточного теплоносителя – пропан. Поскольку природный газ не имеет запаха, перед его подачей потребителям требуется одоризация регазифицированного природного газа. В качестве одоранта применяют этилмеркаптан или тетрагидротиофен [10].

Принципиальная схема регазификационного терминала включает в себя: причал для отгрузки СПГ из танкера-газовоза, резервуары для хранения СПГ, погружные насосы низкого давления, рециркуляционные трубопроводы, компрессоры и конденсаторы паров СПГ, испарители СПГ (рис. 1) [5].

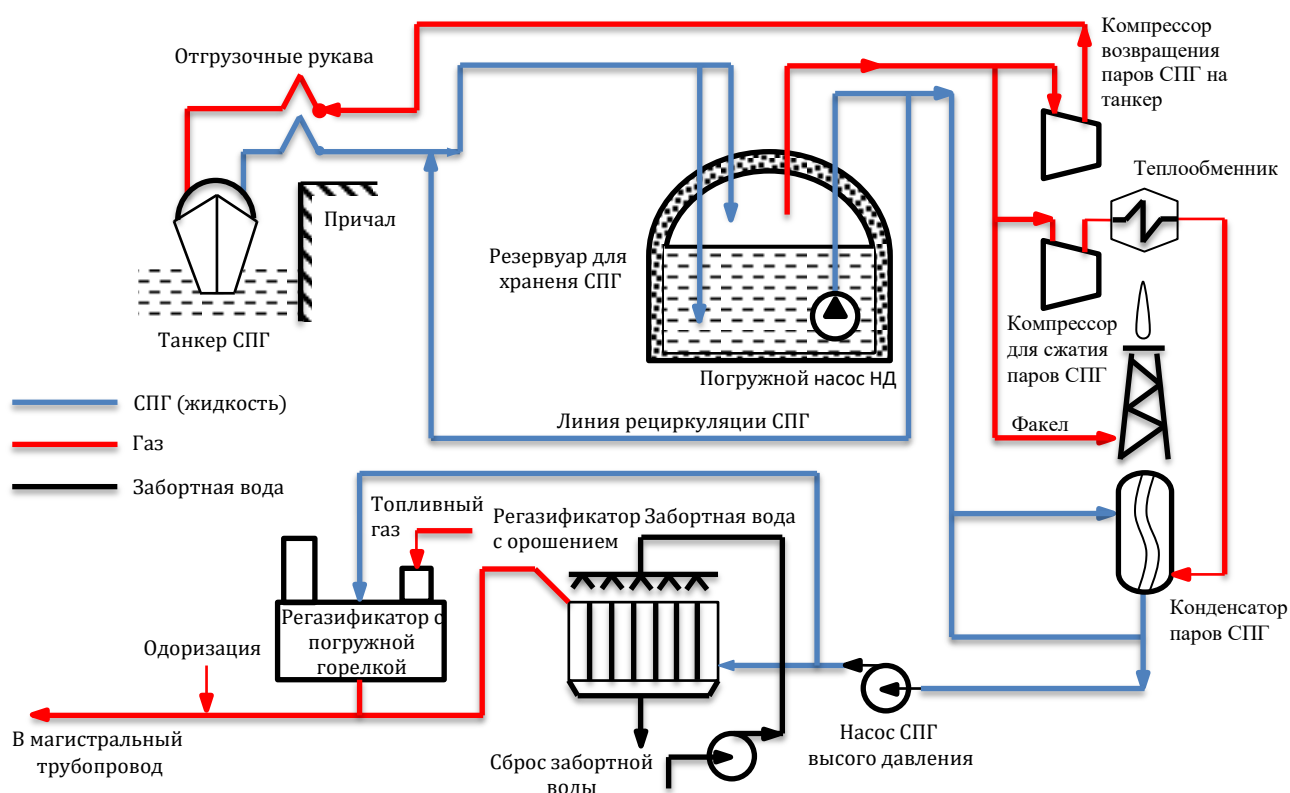


Рис.1. Принципиальная схема регазификационного терминала [11]

Fig.1. Schematic diagram of the regasification terminal [11]

Традиционно интенсивность парообразования B_s выражается в процентах от общего объема хранения СПГ в резервуаре. Скорость испарения рассчитывается, как:

$$f = B_s \frac{V_L \rho_L}{24} \quad (1)$$

где B_s – базовая скорость испарения, принимаемая в пределах 0,05–0,1 % в сутки; V_L – объем СПГ в резервуаре, ρ_L – плотность СПГ.

В последние годы получило распространение скорректированное эмпирическое уравнение [13]:

$$f = \frac{C_R B_s \rho_L V_L}{K_1 K_2 K_3} \quad (2)$$

где C_R – параметр, учитывающий эффект «ролlover», вызванный расходом циркулирующего СПГ (обычно принимается равным 1,2). K_1, K_2, K_3 – поправочные коэффициенты, учитывающие изменение давления СПГ в резервуаре (P) в зависимости от давления паров СПГ (P_v), температуры СПГ (TL) и температуры окружающей среды (T_a) соответственно.

Общий объем образования паров СПГ с учетом изменений скорости парообразования во время погрузочных/разгрузочных операций можно выразить, как:

$$f = \beta_1(P - P_V) + \beta_2 T_L + \beta_3 T_a + \beta_4 \quad (3)$$

где $P - P_V$, T_L и T_a – разность между давлением газовой фазы в резервуаре и давлением паров СПГ, температурой СПГ и температурой окружающей среды соответственно; β_1 , β_2 и β_3 – поправочные коэффициенты для $P - P_V$, T_L и T_a соответственно; β_4 – скорость парообразования при определенных условиях.

Избыточное количество паров СПГ удаляется из резервуара при помощи компрессоров и направляется в систему утилизации [12]. Так поддерживается постоянное давление СПГ в резервуаре. Для удаления избыточного количества паров используют компрессоры нескольких типов: поршневые, роторные, осевые и центробежные.

Чтобы поддерживать расход паров СПГ в необходимом диапазоне, на регазификационных терминалах обычно используется несколько многоступенчатых компрессоров параллельно. Общее потребление энергии компрессорами для сжатия паров СПГ можно рассчитать следующим образом:

$$W^{BOG} = \sum_{i=1}^n W_i^{BOG} \quad (4)$$

$$W_i^{BOG} = \sum_{z=0}^l c^z t_i^z \quad (5)$$

где W_i^{BOG} – потребляемая мощность компрессора i , верхний индекс z – количество компрессоров на уровне нагрузки, а c^z – потребляемая мощность на уровне z . t_i^z – время работы компрессора i на уровне z .

Затраты энергии на работу компрессоров для сжатия паров СПГ следует учитывать, поскольку величина этих энергозатрат влияет на себестоимость утилизации паров сжиженного природного газа.

Для поддержания криогенной температуры разгрузочных рукавов используется линия рециркуляции СПГ (рециркуляционные трубопроводы). Подвод теплоты (Q) к рециркуляционному трубопроводу определяет выражение:

$$Q = f_{cycle} c_p \Delta T \quad (6)$$

где f_{cycle} – массовый расход рециркулирующего СПГ, c_p – удельная теплоемкость, $\Delta T = T_0 - T_{in}$ – разность температур на входе и на выходе рециркуляционного трубопровода.

Подвод теплоты (Q) к рециркуляционному трубопроводу также можно рассчитать следующим образом [13]:

$$Q = KA \Delta T_m \quad (7)$$

$$\Delta T_m = \frac{(T_0 - T_a) - (T_{in} - T_a)}{\ln \frac{T_0 - T_a}{T_{in} - T_a}} \quad (8)$$

$$T_0 = \frac{T_a - T_{in}}{\frac{KA}{e f_{cycle} c_p}} \quad (9)$$

где K – общий коэффициент теплопередачи; A – площадь теплообмена; T_0 – температура СПГ на выходе, T_{in} – температура СПГ на входе, ΔT_m – среднелогарифмическая разность температур.

На регазификационном терминале для перекачки СПГ из резервуара в конденсатор паров СПГ и для подачи охлажденного СПГ в трубопровод рециркуляции используются насосы низкого давления. Потребляемая мощность насосов низкого давления зависит от расхода СПГ в режимах нагнетания и рециркуляции. КПД жидкостных центробежных насосов обычно составляет от 70 до 75%, соответственно 25-30% энергии, затраченной в электродвигателях насосов, выделяется в виде теплоты непосредственно в резервуар для хранения СПГ. Общее потребление энергии насосами можно рассчитать, как:

$$W^{LP} = \sum_{j=1}^m W_j^{LP}, j = 1, \dots, m \quad (10)$$

где j – индекс насоса, W_j^{LP} – потребляемая мощность насоса низкого давления j .

Потребляемая мощность насосов низкого давления может быть снижена за счет уменьшения массового расхода рециркулирующего СПГ (f_{cycle}), что, однако, приведет к увеличению энергопотребления компрессорами для сжатия паров СПГ [13].

Технологические аспекты реализации подобных проектов изучены слабо, в связи с этим возникает научно-техническая проблема рациональной организации процессов погрузки/разгрузки и хранения СПГ на таких терминалах.

Специфика работы перевалочного СПГ-терминала сводится к тому, что он не связан с магистральным трубопроводом. Если на регазификационном терминале образующиеся пары СПГ удастся отправить потребителю по трубопроводам, то строящиеся перевалочные терминалы Северного морского пути находятся на территории с малой плотностью населения и для утилизации паров сжиженного природного газа потребуются другие технологические решения. Чтобы обосновать потребность в данных технологических решениях необходимо проанализировать принципиальную технологическую схему перевалочного терминала и описать алгоритм его работы.

На перевалочных терминалах типовая система погрузки/разгрузки СПГ состоит из погрузочно-разгрузочных рукавов, циркуляционных трубопроводов, перекачивающих СПГ с судов в резервуары для хранения и наоборот, погружных насосов низкого давления, компрессоров и конденсаторов паров СПГ (рис.2)

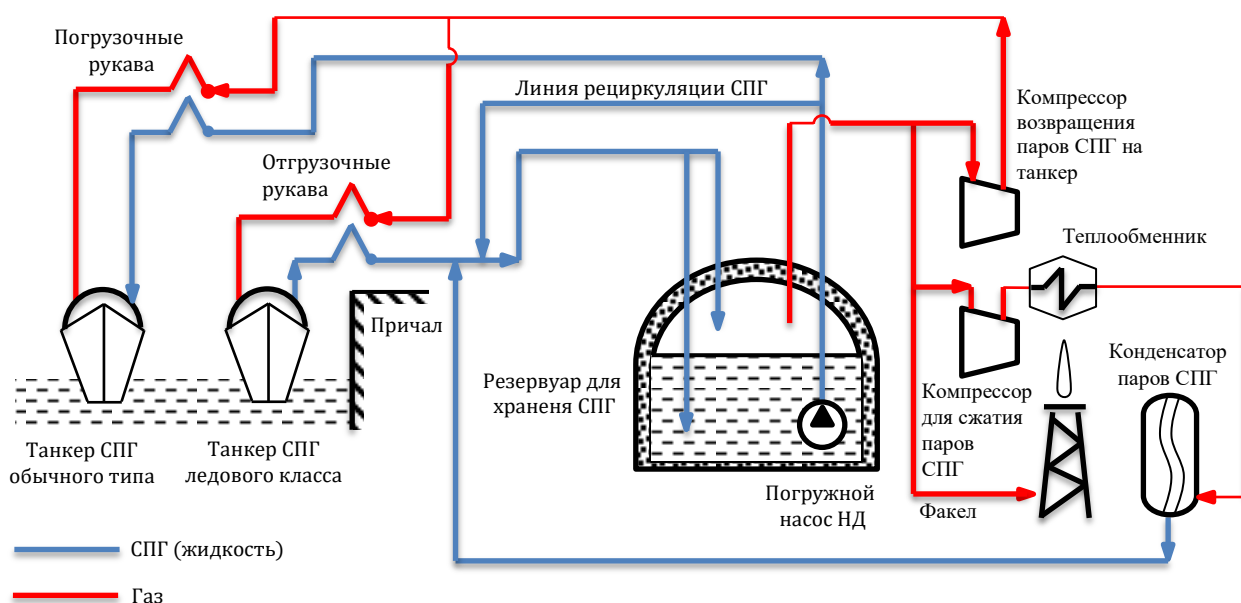


Рис.2. Принципиальная схема перевалочного терминала СПГ

Fig.2. Schematic diagram of an LNG transshipment terminal

На перевалочном терминале нет регазификационного узла, поэтому избыточные пары природного газа, образующиеся в резервуаре для хранения, перекомденсируют и возвращают обратно в хранилище либо сжигают на факельной установке. Контроль давления паров в грузовых танках при погрузке/разгрузке судна осуществляется за счет возврата части паров из резервуаров для хранения в незаполненное пространство танков судна [10]. Таким образом, выброс избыточных паров СПГ в атмосферу не осуществляется. В отличие от регазификационных терминалов, на перевалочных комплексах СПГ хранится в резервуарах короткими циклами. Этот факт может оказывать влияние на скорость парообразования в резервуаре. Как было установлено в работе [6], на начальных этапах испарения скорость парообразования является постоянной величиной. По мере испарения СПГ, оставшаяся жидкость обогащается более тяжелыми углеводородами, и это имеет два термодинамических следствия. Температура кипения и изменение величины скрытой теплоты парообразования возрастают. С течением времени в резервуаре наблюдается снижение интенсивности парообразования. Для анализа технологиче-

ских процессов, протекающих на перевалочном терминале СПГ, из представленного выше математического аппарата могут быть использованы уравнения 1-10.

Вывод. Транспортировка сжиженного природного газа с арктических месторождений по Северному морскому пути требует наличия современного ледокольного флота, отвечающего всем требованиям транспортной и экологической безопасности. Строительство и ввод в эксплуатацию судов усиленного ледового класса типа Arc7, а также создание перегрузочных терминалов в Мурманске и на Камчатке обеспечат круглогодичное движение грузов по Северному морскому пути.

Перегрузочные терминалы могут также использоваться в качестве распределительных газовых хабов или для бункеровки судов СПГ. Сокращение практически вдвое расстояния и времени транспортировки СПГ по Северному морскому пути в страны Азиатско-Тихоокеанского региона позволит уменьшить расходы на доставку СПГ с 89\$(тыс.м³) до 59 \$(тыс.м³) по сравнению с традиционным восточным маршрутом через Суэцкий канал.

Перевалочные терминалы являются важным звеном технологической цепочки транспортирования СПГ по СМП, при этом являются уникальными техническими сооружениями, так как задача бункеровки СПГ с танкеров ледового класса на обычные газозы решается впервые.

При реализации проектов по строительству перевалочных СПГ-терминалов в Мурманске и на Камчатке ожидаемо возникнут проблемы их проектирования и эксплуатации. Это делает актуальным проведение всестороннего анализа технологических процессов, сопровождающих работу этих новых объектов СПГ индустрии.

Специфика работы перевалочного СПГ-терминала заключается в том, что он не связан с магистральным трубопроводом, а хранение СПГ в резервуарах осуществляется короткими циклами. Перевалочные СПГ-терминалы Северного морского пути находятся на территории с малой плотностью населения, поэтому пары сжиженного природного газа достаточно трудно направить в местные газовые сети, их необходимо либо переконденсировать, либо сжигать в качестве топлива. Предварительная оценка испаряемости СПГ на таких терминалах позволит обосновать технологическое решение.

Для выполнения этой исследовательской задачи можно воспользоваться известными из научной литературы аналитическими выражениями, разработанными для регазификационных терминалов СПГ.

Библиографический список:

1. Отчет об итогах внешнеэкономической деятельности Российской Федерации в 2019 году. Министерство экономического развития Российской Федерации [дата обращения: 01.12.2022]. Доступ по ссылке: <https://www.economy.gov.ru/material/file/66eec1250c653fc9abd0419604f44bbd/VED.pdf>
2. Годовой отчет ПАО «Новатэк» за 2020 год. ПАО «Новатэк» [дата обращения: 01.12.2022]. Доступ по ссылке: https://www.novatek.ru/common/upload/doc/NOVATEK_AR2020_RUS.pdf
3. Ларченко Л.В., Колышкин А.В., Яковлева Т.В., Нелюбина Л.В. Может ли Северный морской путь стать конкурентоспособным международным транзитным путём. Инновации, №10, 2018 г. С. 64-67
4. Журавель В.П. Развитие Северного морского пути: национальный и международный аспект// Научно-аналитический вестник Института Европы РАН. - 2019.- № 2.- С. 119-124.
5. Климентьев А.Ю., Родичкин И.Г., Богданов Е.В. Арктические горизонты российского СПГ // Газовая промышленность, 2019, № 9 (790), с. 118-128.
6. Середенко Е.С., Пахомов О.В., Баранов А.Ю. Математическая модель испарения сжиженного природного газа и анализ влияния исходного состава на скорость испарения. Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики – 2020 - Т. 20. - № 4(128). - С. 603-610.
7. Huang, S.; Hartono, J.; Pankaj, S. BOG recovery from long jetties during LNG ship-loading. In Proceedings of the 15th International Conference and Exhibition on Liquefied Natural Gas (LNG15), Barcelona, Spain, 24–27 April 2007; Gas Technology Institute: Barcelona, Spain, 2007; Volume 2, p. PO-34.1.
8. Аметистова Л.Е., Книжников А.Ю. Экологические аспекты СПГ-проектов в арктических условиях. Всемирный фонд дикой природы (WWF), 2016. Москва, - 47 с.
9. MAN Diesel A/S- LNG Carriers with ME-GI Engine and High Pressure Gas Supply System, 2009
10. British Petrol and International Gas Union, Guidebook to Gas Interchangeability and Gas Quality, 2011.

11. Handbook of Liquefied Natural Gas, Chapter 7 - LNG Plant and Regasification Terminal Operations, 2014, p. 297-320
12. Liu, C.; Zhang, J.; Xu, Q.; Gossage, J.L. Thermodynamic-analysis-based design and operation for boil-off gas flare minimization at LNG receiving terminals. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2010, 49, 7412–7420.
13. Ye Z, Mo X, Zhao L. MINLP Model for Operational Optimization of LNG Terminals. *Processes.* 2021; 9(4):599

References:

1. Report on the results of the foreign economic activity of the Russian Federation in 2019. Ministry of Economic Development of the Russian Federation [Accessed 01.12.2022]. URL:<https://www.economy.gov.ru/material/file/66eec1250c653fc9abd0419604f44bbd/VED.pdf>
2. Annual report of PAO Novatek for 2020. PAO Novatek, 2020 [Accessed 01.12.2022]. URL: https://www.novatek.ru/common/upload/doc/NOVATEK_AR2020_RUS.pdf
3. Larchenko L.V., Kolyshkin A.V., YAKovleva T.V., Nelyubina L.V. Mozhet li Severnyj morskoy put' stat' konkurentosposobnym mezhdunarodnym tranzitnym putyom. *Innovacii*, 2018; 10: 64-67 [In Rus].
4. Zhuravel V.P. Razvitiye Severnogo morskogo puti: nacionalnyy i mezhdunarodnyy aspect. *Nauchno-analiticheskij vestnik Instituta Evropy RAN*, 2019; 2:119-124 [In Rus].
5. Klimentyev A.Yu., Rodichkin I.G., Bogdanov Ye.V. Arkticheskie gorizonty rossiiskogo SPG [Arctic horizons of Russian LNG] *Gazovaya promyshlennost' [Gas industry]* 2019; 9 (790): 118-128 [In Rus].
6. Seredenko E.S., Pakhomov O.V., Baranov A.Yu. Mathematical model of liquefied natural gas evaporation and analysis of original composition effect on evaporation speed. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2020; 20(4):603–610 [In Rus].
7. Huang, S.; Hartono, J.; Pankaj, S. BOG recovery from long jetties during LNG ship-loading. In *Proceedings of the 15th International Conference and Exhibition on Liquefied Natural Gas (LNG15)*, Barcelona, Spain, 24–27 April 2007; Gas Technology Institute: Barcelona, Spain, 2007; 2: PO-34.1.
8. Ametistova, L.E., and A. Yu. Knizhnikov. (2016). *Environmental Aspects of Arctic LNG Projects Development*. WWF Moscow, 2016; 47.
9. MAN Diesel A/S- LNG Carriers with ME-GI Engine and High Pressure Gas Supply System, 2009
10. British Petrol and International Gas Union, *Guidebook to Gas Interchangeability and Gas Quality*, 2011.
11. Handbook of Liquefied Natural Gas, Chapter 7 - LNG Plant and Regasification Terminal Operations, 2014; 297-320
12. Liu, C.; Zhang, J.; Xu, Q.; Gossage, J.L. Thermodynamic-analysis-based design and operation for boil-off gas flare minimization at LNG receiving terminals. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2010; 49:7412–7420.
13. Ye Z, Mo X, Zhao L. MINLP Model for Operational Optimization of LNG Terminals. *Processes.* 2021; 9(4):599

Сведения об авторах:

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

Сереженко Елена Сергеевна, аспирант, инженер, образовательный центр «Энергоэффективные инженерные системы»; seredenko_alena@mail.ru; ORCID 0000-0002-3571-7744

Малышева Татьяна Алексеевна, кандидат технических наук, доцент, образовательный центр «Энергоэффективные инженерные системы»; tamalysheva@itmo.ru; ORCID 0000-0002-1171-379X

Кравченко Юлия Андреевна, аспирант, ассистент; jasolonina@itmo.ru; ORCID 0000-0002-5564-9312

Information about authors:

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

Elena S. Seredenko, Postgraduate Student, Engineer, Educational Center "Energy Efficient Engineering Systems"; seredenko_alena@mail.ru; ORCID 0000-0002-3571-7744

Tatyana A. Malysheva, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Educational Center "Energy Efficient Engineering Systems"; tamalysheva@itmo.ru; ORCID 0000-0002-1171-379X

Yulia A. Kravchenko, Post-graduate student, assistant; jasolonina@itmo.ru; ORCID 0000-0002-5564-9312

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 18.12.2022.

Одобрена после рецензирования/ Revised 19.01.2023.

Принята в печать/Accepted for publication 19.01.2023.

ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА
ENERGY AND ELECTRICAL ENGINEERING

УДК 621.362: 537.322

DOI: 10.21822/2073-6185-2023-50-1-15-23

Оригинальная статья /Original Paper

Натурные исследования термоэлектрической системы для теплового воздействия на передний отрезок глазного яблока человека

О.В. Евдулов¹, И.Ю. Аминова², Г.И. Аминов², С.Г. Гасанова¹, П.Н. Суракатова³

¹Дагестанский государственный технический университет,

¹367026, г. Махачкала, пр. И. Шамиля, 70, Россия,

²Филиал ФГБОУ ВО «Университет Дубна» -

Дмитровский институт непрерывного образования,

²141800, г. Дмитров, ул. Космонавтов, д. 33, Россия,

³Дагестанский государственный медицинский университет,

³367012, г. Махачкала, пл. Ленина, 1, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является разработка конструкции термоэлектрической системы (ТЭС) для теплового воздействия на передний отрезок глазного яблока человека, а также проведение ее натурных исследований. **Метод.** Исследование основано на методах термодинамического анализа, натурного и вычислительного моделирования процессов и объектов жизнеобеспечения. **Результат.** Представлена конструкция ТЭС для теплового воздействия на передний отрезок глазного яблока человека. Проведены ее натурные исследования в соответствии с существующими методиками теплофизических измерений. Получены кривые изменения температуры поверхности желатиновой модели глазного яблока человека во времени при охлаждении и нагреве для токов питания термоэлектрического модуля (ТЭМ), входящего в состав ТЭС, равных 2,5 А, 3 А, 3,5 А, А и 1 А, 1,2 А, 1,4 А, а также изменения температуры объекта воздействия во времени при смене режима охлаждения на нагрев и наоборот. Для оценки возможностей отвода теплоты от горячих спаев ТЭМ в системе, получены данные об изменении их температуры во времени при охлаждающем воздействии для различных величин тока питания модулей. **Вывод.** Установлено, что в качестве ТЭМ в системе могут быть использованы стандартные модули, производимые отечественными фирмами. Продолжительность выхода на режим ТЭС составляет порядка 230 с., поэтому представляется целесообразным вывод ТЭС на рабочий режим до непосредственного проведения процедур. Установлено, что продолжительность переключения ТЭС с режима охлаждения в режим нагрева и наоборот составляет 230 с., что требует дальнейшей оптимизации конструкции и режимов работы прибора за счет использования более совершенных типов ТЭМ и применении в переходном режиме форсированного режим работы термомодулей.

Ключевые слова: термоэлектрическая система, термоэлектрический модуль, тепловое воздействие, глазное яблоко, опытный образец, эксперимент, температура

Для цитирования: О.В. Евдулов, И.Ю. Аминова, Г.И. Аминов, С.Г. Гасанова, П.Н. Суракатова. Натурные исследования термоэлектрической системы для теплового воздействия на передний отрезок глазного яблока человека. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023;50(1):15-23. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-1-15-23

Field studies of a thermoelectric system for thermal action on the anterior segment of the human eyeball

O.V. Evdulov¹, I.Yu. Aminova², G.I. Aminov², S.G. Gasanova¹, P.N. Surakatova³

¹Daghestan State Technical University,

¹70 I. Shamiya Ave., Makhachkala 367026, Russia,

²Branch of FGBOU VO "University of Dubna" -

Dmitrov Institute of Continuing Education,
²141800, Dmitrov, st. Kosmonavtov, 33, Russia,
³Daghestan State Medical University,
³1 Lenin Square, Makhachkala 367012, Russia

Abstract. Objective. The aim of the study is to develop the design of a thermoelectric system (TPS) for thermal action on the anterior segment of the human eyeball, as well as to conduct its field studies. **Method.** The study is based on the methods of thermodynamic analysis, natural and computational modeling of processes and life support facilities. **Result.** The design of TPP for thermal impact on the anterior segment of the human eyeball is presented. Its full-scale studies were carried out in accordance with the existing methods of thermophysical measurements. Curves of changes in the temperature of the surface of the gelatin model of the human eyeball over time during cooling and heating were obtained for the supply currents of the thermoelectric module (TEM) included in the TPP, equal to 2.5 A, 3 A, 3.5 A, A and 1 A, 1.2 A, 1.4 A, as well as changes in the temperature of the object of influence over time when changing the cooling mode to heating and vice versa. To assess the possibilities of heat removal from the hot junctions of TEMs in the system, data were obtained on the change in their temperature over time during the cooling effect for various values of the module supply current. **Conclusion.** It has been established that standard modules produced by domestic firms can be used as TEMs in the system. The duration of entering the TPP mode is about 230 s. The refore, it seems appropriate to bring the TPP to the operating mode before the actual procedures are carried out. It has been established that the duration of TPP switching from cooling to heating mode and vice versa is 230 s, which requires further optimization of the design and operating modes of the device through the use of more advanced types of TEMs and the use of forced operation of thermal modules in the transient mode.

Keywords: thermoelectric system, thermoelectric module, thermal effect, eyeball, prototype, experiment, temperature

For citation: O.V. Evdulov, I.Yu. Aminova, G.I. Aminov, S.G. Gasanova, P.N. Surakotova. Field studies of a thermoelectric system for thermal action on the anterior segment of the human eyeball. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science. 2023;50(1):15-23. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-1-15-23

Введение. В современной офтальмологии физиотерапия является одним из существенных компонентов комплексного лечения больных с различными заболеваниями органов зрения. Действие лечебных физических факторов на живой организм обусловлено преобразованием их энергии (электромагнитной, механической, тепловой и др.) в биологический процесс [1-5]. Основу трансформации поглощенной энергии составляют физико-химические сдвиги, происходящие в клетках и тканях, и оказывающие влияние на биофизические, биохимические и физиологические процессы. Из многих факторов физиотерапевтического воздействия наибольший эффект достигается использованием теплоты. Применение теплового воздействия в офтальмологии встречается довольно часто при лечении ряда самых различных заболеваний (конъюнктивит, блефарит, послеоперационная реабилитация и т.п.), причем воздействие осуществляется как равномерное (охлаждение или нагрев), так и контрастное (чередование нагрева и охлаждения).

Среди методов теплового воздействия выделяются действия инфракрасными лучами, парафином, озокеритом, используются припарки, компрессы, примочки, грелки [6-10]. Всем перечисленным средствам присущи недостатки, связанные во многих случаях с неточностью дозировки теплового воздействия, что может вызвать риск ожога, а также сложностью проведения контрастных тепловых процедур с высокой скоростью чередования режимов охлаждения и нагрева, которые применяются при послеоперационном восстановлении, а также для термотренировки тканей глаза.

Постановка задачи. В этих условиях актуальным является разработка и исследо-

вание новых технических средств, позволяющих с высокой эффективностью осуществлять тепловые процедуры в офтальмологии. В качестве таких систем перспективным является использование приборов, в которых роль исполнительного элемента (источника теплоты) будет выполнять ТЭМ [11-15]. Достоинством таких приборов является высокая надежность, точность дозировки тепловой мощности, а также высокое быстродействие и удобство при переключении режимов работы [16-18].

Целью работы является разработка конструкции ТЭС для теплового воздействия на передний отрезок глазного яблока человека, а также проведение ее натурных исследований.

Методы исследования. Конструктивно ТЭС для теплового воздействия на передний отрезок глазного яблока человека реализуется в виде зонда, на торцевой поверхности которого, приводимой в контакт с глазом размещен ТЭМ. ТЭМ со стороны контакта с глазом снабжен специальной насадкой, повторяющей форму глазного яблока. При проведении процедур ТЭМ питается от регулируемого источника постоянного напряжения и осуществляет в зависимости от его полярности либо нагрев, либо охлаждение биологического объекта.

Разработан опытный образец ТЭС для теплового воздействия на передний отрезок глазного яблока человека. Его структурная схема представлена на рис. 1.

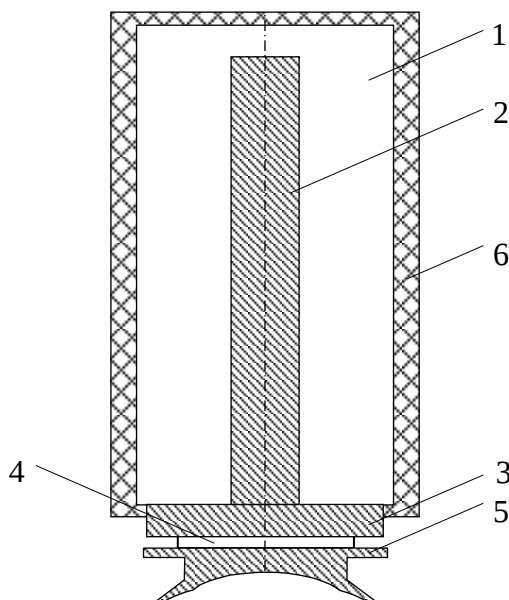


Рис. 1. Конструкция ТЭС для теплового воздействия на передний отрезок глазного яблока человека

1 - цилиндрическая емкость, заполненная льдом, 2 - медный стержень, 3 - медный диск, 4 - ТЭМ, 5 - медная насадка с нанесенной на ее поверхность, контактирующей с глазом, антисептической пленкой, 6 - теплоизоляция

Fig. 1. The design of the TPP for thermal exposure to the anterior segment of the human eyeball

1 - cylindrical container filled with ice, 2 - copper rod, 3 - copper disk, 4 - TEM, 5 - copper nozzle with an antiseptic film applied to its surface in contact with the eye, 6 - thermal insulation

Проведены экспериментальные исследования данной конструкции. Исследования проводились при воздействии на желатиновую модель глазного яблока человека, погруженную на две трети в воду в стакане, температура которой регулировалась на уровне 310 К. В качестве ТЭМ, входящего в состав ТЭС, использовался термомодуль типа ТВ-127-1.0-1.5 (производитель ООО Криотерм, г. Санкт-Петербург) [19]. Питание ТЭМ осуществлялось источником электрической энергии GPR-1850HD (производитель GW Instek, Тайвань). Для проведения измерений использовались встроенные в источник электрической энергии амперметр и вольтметр, а также многоканальный измеритель температуры ИРТМ

2402/М3Ех-2 (производитель - компания НПП «Элемер», Россия), подключаемый к ПЭВМ. Непосредственно определение температуры осуществлялось медь-константановыми термопарами, подключаемыми к входу прибора ИРТМ 2402/М3Ех-2.

В качестве контрольных точек рассматривались поверхности холодных и горячих спаев ТЭМ, желатиновая модель глаза, насадка, медный стержень, температура воды в стакане.

Обсуждение результатов. В качестве определяющих условий при проведении эксперимента задавались следующие параметры: температура поверхности желатиновой модели глазного яблока человека, контактирующей с ТЭС - от 280 К до 314 К, температура окружающей среды - 295 К, точность поддержания температуры - 0,5 К, температура воды в стакане - 310 К. На рис. 2-3 представлены кривые изменения температуры поверхности желатиновой модели глазного яблока человека во времени при охлаждении и нагреве для токов питания ТЭМ, равных 2,5 А, 3 А, 3,5 А, А и 1 А, 1,2 А, 1,4 А.

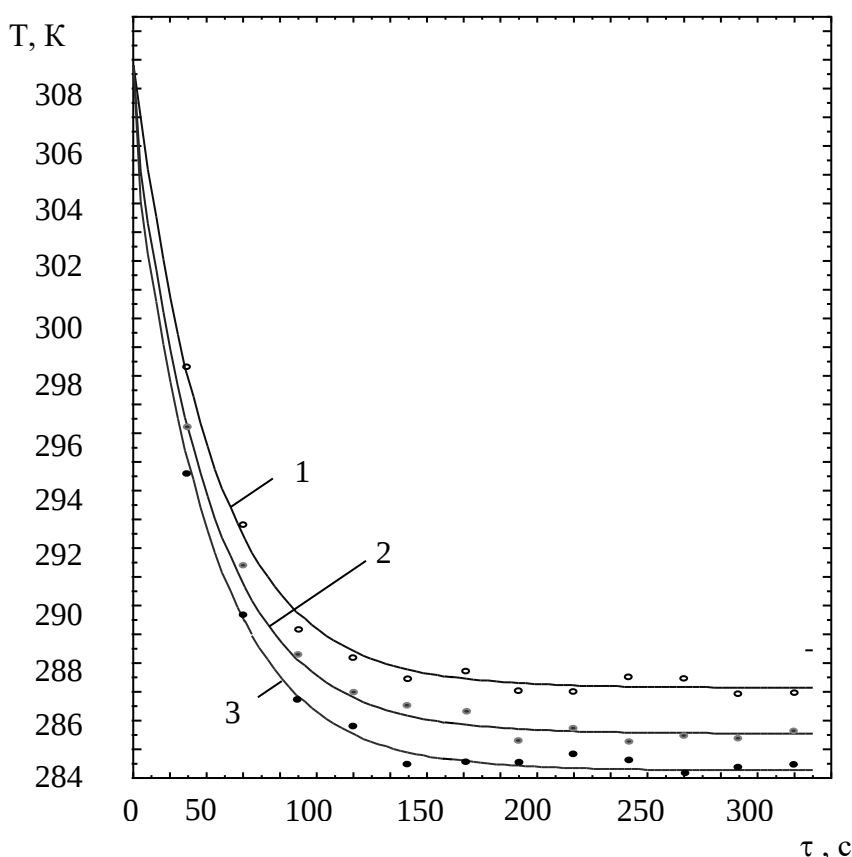


Рис.2. Изменение температуры желатиновой модели глазного яблока во времени при охлаждении для различных значений токов питания ТЭМ

Fig. 2. Change in the temperature of the gelatin model of the eyeball over time during cooling for various values of the TEM supply currents

На рис. 2-3 нумерация кривых растёт соответственно увеличению тока питания ТЭМ.

Как следует из представленных данных продолжительность выхода в стационарный режим системы ТЭС - биологический объект составляет при работе системы в режиме охлаждения примерно 230 с. и нагрева 200 с.

При этом увеличение тока питания ТЭМ приводит к уменьшению температуры биологического объекта при работе ТЭС в режиме охлаждения и увеличению его температуры при работе ТЭС в режиме нагрева, что соответствует повышению мощности ТЭМ. Следует отметить, что рабочий ток питания ТЭС при работе последней в режиме нагрева существенно меньше (1-1,4 А), чем в случае ее эксплуатации в режиме охлаждения (2,5-

3,5 А), что связано с температурными режимами проведения процедур, ограниченными сверху 314 К (соответствует появлению болевых ощущений у человека).

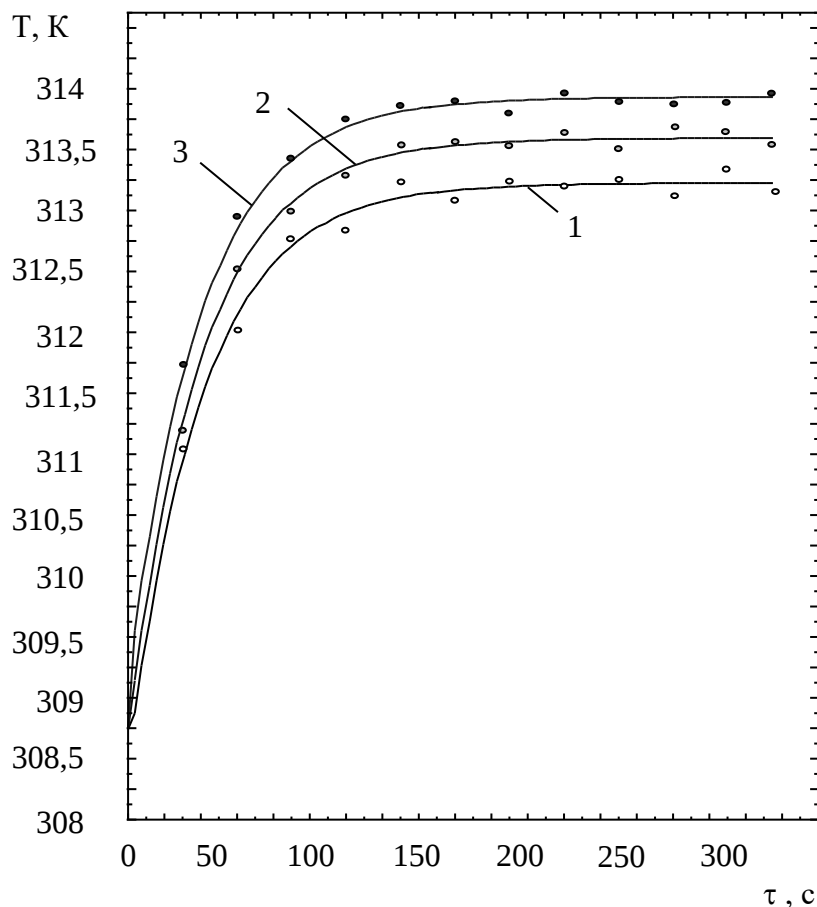


Рис. 3. Изменение температуры желатиновой модели глазного яблока во времени при нагреве для различных значений токов питания ТЭМ
Fig. 3. Change in the temperature of the gelatin model of the eyeball over time during heating for various values of the TEM supply currents

Для изучения динамических режимов работы ТЭС получены кривые изменения температуры объекта воздействия во времени при смене режима охлаждения на нагрев и наоборот. Данные зависимости представлены на рис. 4-5.

Результаты рассмотрены для режимов: 1 - $I_{\text{охл}}=3$ А, $I_{\text{нагр}}=1$ А; 2 - $I_{\text{охл}}=2,5$ А, $I_{\text{нагр}}=0,8$ А; 3 - $I_{\text{охл}}=2$ А, $I_{\text{нагр}}=0,4$ А, где $I_{\text{охл}}$ - сила тока питания при работе ТЭМ в режиме охлаждения, $I_{\text{нагр}}$ - сила тока питания при работе ТЭМ в режиме нагрева.

В обоих случаях продолжительность переходного процесса с режима охлаждения на режим нагрева и наоборот относительно незначительна и составляет порядка 230 с.

При этом следует отметить, что для ускорения смены режимов воздействия может быть использован кратковременный форсированный режим работы ТЭМ, состоящий в повышении их тока питания и соответственно мощности в переходном режиме работы прибора.

Для выхода на рабочий режим целесообразным является применение режима максимальной холодопроизводительности ТЭМ, тогда, как в дальнейшем будет применяться режим максимального холодильного коэффициента [20]. В этом случае продолжительность выхода прибора на режим будет минимизирована.

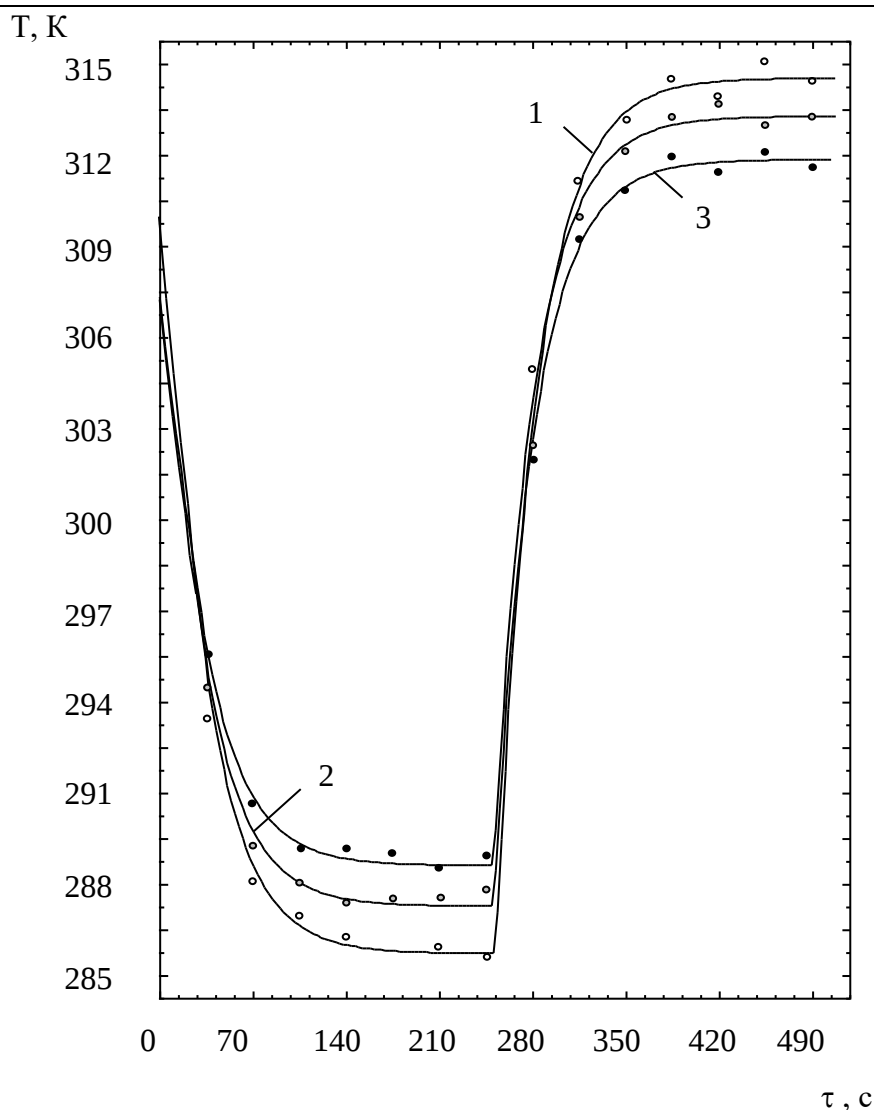


Рис. 4. Изменение температуры желатиновой модели глазного яблока во времени при смене режима охлаждения на нагрев для различных значений токов питания ТЭМ

Fig. 4. Changes in the temperature of the gelatin model of the eyeball over time when changing the cooling to heating mode for various values of the TEM supply currents

Для оценки возможностей отвода теплоты от горячих спаев ТЭМ в системе получены данные об изменении их температуры во времени при охлаждающем воздействии для различных величин тока питания модулей. Согласно ним следует, что значение температуры горячих спаев ТЭМ вполне приемлемо для используемого типа стандартных модулей вплоть до максимального значения тока питания (при токе питания 3,5 А температура горячих спаев ТЭМ составляет 324 К).

ТЭС теплового воздействия на передний отрезок глазного яблока человека была апробирована в ГУ НПО «Дагестанский центр микрохирургии глаза» (г. Каспийск), а так же в 89 поликлинике ВМФ (Московская область, Дмитровский район, сельский поселок Горки). Были проведены 54 процедуры девяти пациентам с различными заболеваниями органа зрения.

Из них, три пациента с необскурающими помутнениями роговицы после лазерной хирургии, два пациента с послеоперационными воспаленными реакциями, один – с вирусным кератитом, два пациента с кератоконъюнктивитами не в стадии обострения и один – с передним увеитом не в стадии обострения.

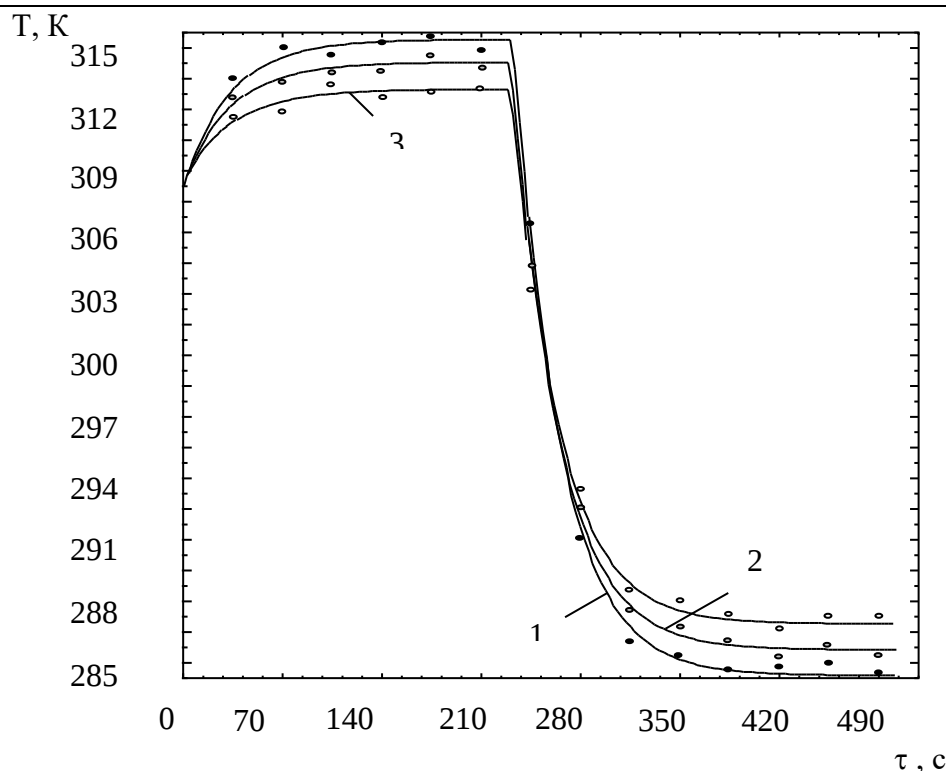


Рис. 5. Изменение температуры желатиновой модели глазного яблока во времени при смене режима нагрева на охлаждение для различных значений токов питания ТЭМ

Fig. 5. Changes in the temperature of the gelatin model of the eyeball over time when changing the heating mode to cooling for different values of the TEM supply currents

В ходе апробации данного устройства были выявлены следующие положительные моменты: помутнения роговицы, возникающие как последствия лазерных хирургических вмешательств, рассасываются быстрее в 1,5 раза по сравнению с пациентами, при лечении которых не использовалась ТЭС теплового воздействия на передний отрезок глазного яблока; температура переднего отрезка глазного яблока при проведении процедур варьировалась в пределах от 280 К до 313 К с точностью 0,5 К; послеоперационные воспалительные реакции снимались после третьей процедуры. В ходе апробации ТЭС для теплового воздействия на передний отрезок глазного яблока человека не наблюдалось осложнений.

Вывод. Разработана ТЭС для теплового воздействия на передний отрезок глазного яблока человека, исполнительным элементом в которой является ТЭМ, дающий возможность сочетать в едином приборе режимы охлаждения и нагрева, а также контрастного теплового воздействия. Проведены натурные испытания разработанной ТЭС.

В результате измерений установлено, что в качестве ТЭМ в системе могут быть использованы стандартные модули, производимые отечественными фирмами. Продолжительность выхода на режим ТЭС составляет порядка 230 с., поэтому представляется целесообразным вывод ТЭС на рабочий режим до непосредственного проведения процедур.

В рамках эксперимента установлено, что продолжительность переключения ТЭС с режима охлаждения в режим нагрева и наоборот составляет 230 с., что требует дальнейшей оптимизации конструкции и режимов работы прибора за счет использования более совершенных типов ТЭМ и применении в переходном режиме форсированного режим работы термомодулей. ТЭС апробирована в клинической практике, при этом после проведения 54 процедур для девяти пациентов наблюдались положительные эффекты в части оздоровительного процесса.

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00130, <https://rscf.ru/project/23-29-00130/>.

Acknowledgments. The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 23-29-00130, <https://rscf.ru/project/23-29-00130/>.

Библиографический список:

1. Зубкова С.М. Роль тепловой компоненты в лечебном действии физических факторов // Физиотерапия, бальнеология и реабилитация. - 2011. - №6. - С.3-10.
2. Боголюбов В.М., Сидоров В.Д. Физиотерапия в реабилитации больных ревматоидным артритом // Физиотерапия, бальнеология и реабилитация. - 2012. - № 2. - С.3-9.
3. Ушаков А.А. Практическая физиотерапия. М.: ООО Медицинское информационное агентство, 2009. - 612 с.
4. Пономаренко Г.Н. Восстановительная медицина: фундаментальные основы и перспективы развития // Физическая и реабилитационная медицина. - 2022. - т. 4, № 1. - С.8-20.
5. Боголюбов В.М. [и др.] Техника и методики физиотерапевтических процедур. - М.: Бином, 2017. - 464 с.
6. Баранов А.Ю., Василенок А.В., Соколова Е.В., Чубова С.Д., Зиявидинов А.М. Выбор альтернативного криоагента для покрытия тепловой нагрузки в установке для общего криотерапевтического воздействия // Вестник Международной академии холода. - 2022. - № 1. - С.76-82.
7. Ежов В.В. Физиотерапия и физиопрофилактика как методы и средства сохранения и восстановления здоровья // Физиотерапия, бальнеология и реабилитация. - 2011. - № 4. - С.33-36.
8. Pasquali P. Cryosurgery: a practical manual. - New York: Springer, 2015. - 441 p.
9. Цыганов, Д.И. Криомедицина: процессы и аппараты. М.: САЙНС-ПРЕСС, 2011. - 304 с.
10. Гуляев А.А. Оформление аппаратно/физиотерапевтических процедур согласно требованиям Минздрава РФ // Аппаратная косметология. - 2017. - № 1. - С.14-20.
11. Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Юсуфов Ш.А., Аминов Г.И. Приборы для локального температурного воздействия на человеческий организм // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки, 2003. №2. С.3-6.
12. Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Набиев Н.А., Рагимова Т.А. Термоэлектрическое устройство для остановки кровотечения // Медицинская техника. 2019. № 2. С. 12-14.
13. Исмаилов Т.А. Евдулов О.В., Набиев Н.А., Магомедова С.Г. Модель термоэлектрического устройства для теплового воздействия на рефлексогенные зоны//Медицинская техника. 2020. № 1. С. 40-43.
14. Hu B., Shi X.-L., Chen Z.-G., Zou J. Thermoelectrics for medical applications: progress, challenges and perspectives // Chemical engineering journal. - 2022. - Vol. 437. - P.135268.
15. Zaferani S.H., Ghomashchi R., Sams M.W., Chen Z.-G. Thermoelectric coolers as thermal management systems for medical application: design, optimization and advancement // Nano energy. - 2021. - Vol. 90. - P. 106572.
16. Goldsmid H.J. Thermoelectric refrigeration, New York: Springer, 2013. - 240 p.
17. Абоуеллаиль А.А., Чан Ц., Солдатов А.И., Солдатов А.А., Костина М.А., Борталевич С.И., Солдатов Д.А. Лабораторное обоснование термоэлектрического метода контроля переходного сопротивления контактов // Дефектоскопия. 2022. № 12. С. 70-78.
18. Yevdulov O.V., Ragimova T.A. Investigation of thermoelectric system for local freezing of tissues of the larynx // Journal of Thermoelectricity. - 2015. - № 2. - P. 86-94.
19. <http://www.kryotherm.ru/> (дата доступа 22.02.2023).
20. Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Абдулхакимов У.И., Евдулов Д.В. Термоэлектрическая система для проведения тепловых косметологических процедур на лице // Медицинская техника. - 2017. - № 4. - С.38-42.

References:

1. Zubkova S.M. The role of the thermal component in the therapeutic effect of physical factors. *Physiotherapy, balneology and rehabilitation*. 2011; 6:3-10. [In Russ]
2. Bogolyubov V.M., Sidorov V.D. Physiotherapy in the rehabilitation of patients with rheumatoid arthritis. *Physiotherapy, balneology and rehabilitation*. 2012;2:3-9. [In Russ]
3. Ushakov A.A. Practical physiotherapy. M.: OOO Medical Information Agency, 2009; 612. [In Russ]
4. Ponomarenko G.N. Restorative medicine: fundamental foundations and development prospects. *Physical and Rehabilitation Medicine*. 2022; 4(1):8-20. [In Russ]
5. Bogolyubov V.M. [And. etc.] Technique and methods of physiotherapeutic procedures. M.: Binom, 2017; 64. [In Russ]
6. Baranov A.Yu., Vasilenok A.V., Sokolova E.V., Chubova S.D., Ziyavidinov A.M. The choice of an alternative cryoagent to cover the thermal load in the installation for general cryotherapy. *Herald of the International Academy of Cold*. 2022;1:76-82. [In Russ]
7. Ezhov V.V. Physiotherapy and physioprophyllaxis as methods and means of maintaining and restoring health. *Physiotherapy, balneology and rehabilitation*. 2011; 4:33-36. [In Russ]
8. Pasquali P. Cryosurgery: a practical manual. New York: Springer, 2015; 441
9. Tsyganov D.I. Cryomedicine: processes and devices. M.: SCIENCE PRESS, 2011; 304. [In Russ]

10. Gulyaev A.A. Registration of hardware / physiotherapy procedures in accordance with the requirements of the Ministry of Health of the Russian Federation. *Hardware cosmetology*. 2017; 1:14-20. [In Russ]
11. Ismailov T.A., Evdulov O.V., Yusufov Sh.A., Aminov G.I. Devices for local temperature effects on the human body. *Izvestiya vuzov. North Caucasian region. Technical sciences*, 2003; 2:3-6. [In Russ]
12. Ismailov T.A., Evdulov O.V., Nabiev N.A., Ragimova T.A. Thermoelectric device to stop bleeding. *Medical technology*. 2019; 2: 12-14. [In Russ]
13. Ismailov T.A. Evdulov O.V., Nabiev N.A., Magomedova S.G. Model of a thermoelectric device for thermal action on reflexogenic zones. *Meditsinskaya tekhnika*. 2020; 1: 40-43. [In Russ]
14. Hu B., Shi X.-L., Chen Z.-G., Zou J. Thermoelectrics for medical applications: progress, challenges and perspectives. *Chemical engineering journal*. 2022; 437:135268.
15. Zaferani S.H., Ghomashchi R., Sams M.W., Chen Z.-G. Thermoelectric coolers as thermal management systems for medical application: design, optimization and advancement. *Nano energy*. 2021;90: 106572.
16. Goldsmid H.J. Thermoelectric refrigeration, *New York: Springer*, 2013; 240.
17. Abouellail A.A., Chan Ts., Soldatov A.I., Soldatov A.A., Kostina M.A., Bortalevich S.I., Soldatov D.A. Laboratory substantiation of the thermoelectric method for controlling the transitional resistance of contacts. *Defectoscopy*. 2022; 12: 70-78.
18. Yevdulov O.V., Ragimova T.A. Investigation of thermoelectric system for local freezing of tissues of the larynx. *Journal of Thermoelectricity*. 2015; 2:86-94.
19. <http://www.kryotherm.ru> (accessed February 22, 2023).
20. Ismailov T.A., Evdulov O.V., Abdulkhakimov U.I., Evdulov D.V. Thermoelectric system for conducting thermal cosmetic procedures on the face. *Medical technology*. 2017; 4:38-42.

Сведения об авторах:

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

Аминов Гарун Ильясович, кандидат технических наук, доцент, начальник отдела развития компетенций; g.aminov@yandex.ru.

Аминова Ирина Юрьевна, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии цифровой трансформации; irzarema@yandex.ru.

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

Суракатова Патимат Нурмагомедовна, студентка; sur71@yandex.ru

Information about authors:

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

Garun I. Aminov, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Head of Competence Development Department; g.aminov@yandex.ru.

Irina Yu. Aminova, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Department of Digital Transformation Technology; irzarema@yandex.ru.

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

Patimat N. Surakatova, Student; sur71@yandex.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 10.12.2022.

Одобрена после рецензирования/ Revised 19.01.2023.

Принята в печать/Accepted for publication 19.01.2023.

ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА
ENERGY AND ELECTRICAL ENGINEERING

УДК 621.56

DOI: 10.21822/2073-6185-2023-50-1-24-32

Оригинальная статья /Original Paper

Моделирование процесса холодильного воздействия на пищевые продукты

Р.А. Жлобо, М.В. Шамаров, В.И. Алёшин

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

Резюме. Цель. Целью исследования является моделирование продолжительности холодильного воздействия на пищевой продукт. **Метод.** Продолжительность холодильного воздействия состоит из двух этапов: охлаждения и заморозки. При этом теплофизические характеристики продукции определяются практически на специализированной экспериментальной установке, разработанной в лаборатории кафедры технологического оборудования и систем жизнеобеспечения. **Результат.** Зная технологические режимы, можно определять время, затраченное на охлаждение и заморозку различных пищевых продуктов. **Вывод.** Данную методику можно применять в широких климатических условиях на производствах Российской Федерации в крупных масштабах. Если увеличить скорость воздуха у поверхности продукта до 3 м/с, то получим сокращение времени на 502 с при условии $R = 0,015$ м и $\delta = 0,125$ м. Имея начальные и конечные условия можно быстро определять продолжительность холодильного воздействия для любых других пищевых продуктов, выбирая оптимальный режим.

Ключевые слова: охлаждение, замораживание, криоскопическая температура, расчёт, теплофизические характеристики, эксперимент.

Для цитирования: Р.А. Жлобо, М.В. Шамаров, В.И. Алёшин. Моделирование процесса холодильного воздействия на пищевые продукты. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023; 50(1):24-32. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-1-24-32

Modeling the process of refrigeration effects on food products

R.A. Zhlobo, M.V. Shamarov, V.I. Alyoshin

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

Abstract. Objective. The present article discusses the issue of modeling the duration of the refrigeration effect on a food product using the example of raw lean meat. **Method.** The duration of the refrigeration effect consists of two stages: cooling and freezing. At the same time, the thermophysical characteristics of products are determined practically on a specialized experimental setup developed in the laboratory of the Department of Technological Equipment and Life Support Systems. **Result.** Knowing the technological regimes, it is possible to determine the time spent on cooling and freezing various food products. **Conclusion.** This technique can be applied in wide climatic conditions in the production of the Russian Federation on a large scale. If we increase the air speed at the surface of the product to 3 m/s, we will get a reduction in time by 502 s, provided $R = 0.015$ m and $\delta = 0.125$ m. Having the initial and final conditions, you can quickly determine the duration of the refrigeration exposure, both for raw lean meat, and for any other food products, choosing the optimal one.

Key words: cooling, freezing, cryoscopic temperature, calculation, thermophysical characteristics, experiment

For citation: R.A. Zhlobo, M.V. Shamarov, V.I. Alyoshin. Modeling the process of refrigeration effects on food products. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science. 2023; 50 (1): 24-32. DOI: 10.21822 /2073-6185-2023-50-1-24-32

Введение. Эффект от холодильного консервирования продуктов обнаруживается после их отепления или размораживания, исключения составляют процессы замораживания с целью проведения сублимации, измельчения, то есть процессы холодильной обработки без использования последующего размораживания. В действительности, положительный эффект зависит от совершенства процессов холодильной обработки и техники. Нахождение рациональных и оптимальных, режимов холодильной обработки того или иного продукта является одной из главных задач холодильной техники и технологии. Решение такой задачи требует, прежде всего, уточнения основного физического параметра, характеризующего режим холодильной обработки, такого как продолжительности охлаждения. В настоящее время часто таким параметром является скорость замораживания продукта. Именно понятию скорости замораживания в холодильной технологии уделяется немалое внимание, как наиболее существенному показателю при теплофизической оценке процесса. Кроме того, интенсивности процесса или его скорости придают первостепенное значение как фактору, влияющему на качество процесса. Если считать, что о состоянии объекта в начале и в конце процесса наиболее полно свидетельствуют его среднеобъемная температура, то в качестве параметра, характеризующего сам процесс, можно использовать «период активного воздействия холодом».

Под периодом активного воздействия холодом следует понимать продолжительность холодильной обработки объекта с данной начальной среднеобъемной температурой до момента достижения им конечной, заданной среднеобъемной температуры. С практической точки зрения параметр «период активного воздействия холодом» определяет то время, в течение которого объект холодильной обработки должен непосредственно находиться в холодильной (морозильной) камере до достижения заданной температуры и может быть легко зафиксирован инструментально [1-9].

Постановка задачи. Для моделирования процессов охлаждения и замораживания продуктов авторами был создан экспериментальный стенд. Стенд предназначен для исследования влияния скорости и температуры воздуха на время охлаждения и замораживания пищевых продуктов, а также для изучения нестационарных процессов теплообмена и теплопереноса. Принципиальная схема лабораторного стенда показана на рис. 1.

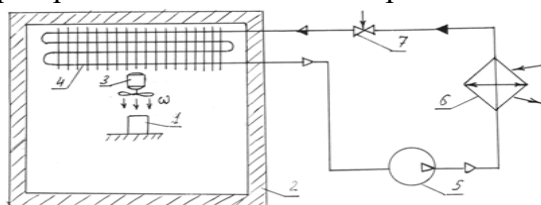


Рис. 1. Схема лабораторного стенда

1 – исследуемый объект; 2 – теплоизолированная камера; 3 – вентилятор с электродвигателем; 4 – оребренный испаритель; 5 – компрессор холодильной машины; 6 – конденсатор; 7 – дроссельный клапан

Fig. 1. Scheme of the laboratory stand

1 - the object under study; 2 - heat-insulated chamber; 3 – fan with electric motor; 4 – finned evaporator; 5 – refrigerator compressor; 6 - capacitor; 7 - throttle valve

Исследуемый продукт 1 располагается в теплоизолированной холодильной камере 2. Вентилятор 3 создает принудительное движение охлажденного воздуха у поверхности продукта с заданной скоростью м/с. Холодильный агент в испарителе холодильной машины 4 воспринимает теплоту от охлаждаемого продукта, кипит, и его пары поступают в компрессор 5, где они сжимаются до давления конденсации и поступают в конденсатор 6, в котором пары охлаждаются и конденсируются. После этого жидкий холодильный агент дросселируется в дроссельном клапане 7 до давления кипения, после чего поступает в испаритель 4. В качестве измеряемой температуры применяются медь-константановые термопары. Для установки термопар в исследуемом продукте необходимо предварительно его подготовить (выполнить отверстия диаметром 3 мм и глубиной R, где R – это величина

на равная половине толщины пластины продукта). До начала испытаний необходимо подготовить стенд к работе (заблаговременно запустить в работу холодильную машину для обеспечения стабильного режима термообработки) [10-18].

Методы исследования. Продолжительность холодильного воздействия $\tau_{\text{общ}}$ состоит из двух слагаемых: $\tau_{\text{общ}} = \tau_1 + \tau_2$:

где τ_1 – продолжительность охлаждения, т.е. периода времени, соответствующего достижению на поверхности продукта криоскопической температуры, с;

τ_2 – продолжительность замораживания, т.е. периода достижения заданной среднеобъемной температуры продукта, с [19].

Для определения продолжительности охлаждения τ_1 , с, воспользуемся формулой:

$$\tau_1 = \varphi \cdot \frac{c_1 \cdot \rho_1 \cdot R^2}{\lambda_1} \cdot \left[\left(\frac{2.3}{Bi_1} + 0,8 \right) \cdot \log \left(\frac{t_n - t_{oc}}{t_{n1} - t_{oc}} \right) + 0,12 \right]; \quad (1)$$

где φ – коэффициент формы продукта;

c_1 – удельная теплоёмкость продукта, Дж/(кг·К);

ρ_1 – плотность продукта, кг/м³;

R – расстояние от поверхности до термического центра, м;

λ_1 – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);

Bi_1 – теплообменный критерий Био;

t_n – начальная температура поверхности продукта, °С;

t_{oc} – температура окружающей среды, °С;

t_{n1} – конечная температура охлаждения, °С.

$$Bi_1 = \frac{\alpha \cdot R}{\lambda_1};$$

где α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К).

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda_b}{\delta};$$

где Nu – число Нуссельта;

λ_b – коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м·К);

δ – определяющий размер для определения числа Нуссельта (длина поверхности продукта в направлении потока воздуха), м.

$$Nu = 0,245 \cdot Re^{0,6};$$

где Re – числа Рейнольдса.

$$Re = \frac{\omega \cdot \delta}{\nu_b};$$

где ω – скорость воздуха у поверхности продукта, м/с;

ν_b – кинематическая вязкость воздуха, м²/с.

$$t_{n1} = t_{кр} + \frac{Bi_1}{n} \cdot (t_{кр} - t_{oc}) \cdot (1 - \psi);$$

где $t_{кр}$ – криоскопическая температура, °С;

n – показатель степени функции распределения температуры по толщине объекта; в нестационарных процессах холодильной технологии зависит от многих факторов и, в первую очередь, от теплофизических свойств тела, его размеров, а также от коэффициента теплоотдачи. Для технологических расчётов с достаточной точностью можно принять $n = 2$;

ψ – параметр, который зависит от геометрии объекта (для тел простейших форм его величину можно определить по формулам: для пластины $\psi = \frac{1}{n+1}$).

Продолжительность замораживания τ_2 , с, определяется по формуле:

$$\tau_2 = \frac{1}{2} \cdot \varphi \cdot \frac{\rho_2 \cdot R^2 \cdot W \cdot r}{\lambda_2 \cdot (t_k - t_{H2})} \cdot \left[1 - \frac{t_k}{t_k - \frac{(t_k - t_{H2}) \cdot z}{2 \cdot \left(\frac{1}{Bi_2} + z \right)}} \cdot \left(z^2 + \frac{2 \cdot z}{Bi_2} \right) \right]; \quad (2)$$

где ρ_2 – плотность продукта после охлаждения, кг/м³;

W – относительное начальное влагосодержание, доли единицы;
 r – теплота фазового перехода, Дж/кг;
 λ_2 – коэффициент теплопроводности после охлаждения, Вт/(м·К);
 t_{H2} – конечная температура заморозки, °С;
 Bi_2 – теплообменный критерий Био после охлаждения;
 z – относительная толщина замороженного слоя.

Относительная толщина замороженного слоя зависит от конечной заданной среднеобъемной температуры, начального относительного влагосодержания, определяющего размера объекта (расстояния от поверхности до термического центра) и от условий организации теплообмена; определяется из системы четырех уравнений. Однако, если температура охлаждающей среды не опускается ниже минус 50 °С, а коэффициент теплоотдачи на поверхности теплообмена не превышает 70-80 Вт/(м²·К), то относительную толщину замороженного слоя можно принять равной единице ($z=1$), что соответствует условиям замораживания в современных воздушных скороморозильных аппаратах [20].

Обсуждение результатов. Экспериментальные исследования и моделирования процесса охлаждения и замораживания продукции осуществлялось для следующих условий: сырая тощая говядина; форма - пластина, $\varphi=1$; $c_1 = 3349$ Дж/(кг·К); $\rho_1 = 1070$ кг/м³; $R = 0,015$ м; $\lambda_1 = 0,453$ Вт/(м·К); $t_H = +10$ °С; $t_{oc} = -30$ °С; $\lambda_B = 2,20 \cdot 10^{-2}$ Вт/(м·К); $\delta = 0,125$ м; $\omega = 1,5$ м/с; $v_B = 10,8 \cdot 10^{-6}$ м²/с; $t_{кр} = -2$ °С; $\rho_2 = 1070$ кг/м³; $W = 0,7$; $r = 335000$ Дж/кг; $\lambda_1 = 1,392$ Вт/(м·К); $t_{H2} = -8$ °С.

Расчёт основного режима:

$$Re = \frac{1,5 \cdot 0,125}{10,8 \cdot 10^{-6}} = 1,736 \cdot 10^4.$$

$$Nu = 0,245 \cdot (3,472 \cdot 10^4)^{0,6} = 85,687.$$

$$\alpha = \frac{85,687 \cdot 2,20 \cdot 10^{-2}}{0,125} = 15,081 \left(\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}} \right).$$

$$Bi_1 = \frac{15,081 \cdot 0,015}{0,453} = 0,499.$$

$$t_{H1} = -2 + \frac{0,499}{2} \cdot (-2 + 30) \cdot \left(1 - \frac{1}{2 + 1} \right) = 2,661 \text{ (}^\circ\text{C)}.$$

$$\tau_1 = 1 \cdot \frac{3349 \cdot 1070 \cdot 0,015^2}{0,453} \cdot \left[\left(\frac{2,3}{0,499} + 0,8 \right) \cdot \log \left(\frac{10 + 30}{2,661 + 30} \right) + 0,12 \right] = 1,061 \cdot 10^3 \text{ (с)}.$$

$$Bi_2 = \frac{\alpha \cdot R}{\lambda_2};$$

$$Bi_2 = \frac{15,081 \cdot 0,015}{1,392} = 0,163;$$

$$t_{H2} = t_K + \frac{Bi_2}{n} \cdot (t_K - t_{oc}) \cdot (1 - \psi);$$

где t_K – конечная температура продукта, °С.

$$t_{H2} = -8 + \frac{0,163}{2} \cdot (-8 + 30) \cdot \left(1 - \frac{1}{2 + 1} \right) = -6,808 \text{ (}^\circ\text{C)};$$

$$\tau_2 = \frac{1}{2} \cdot 1 \cdot \frac{1070 \cdot 0,015^2 \cdot 0,7 \cdot 335000}{1,392 \cdot (-8 + 6,808)} \cdot \left[1 - \frac{-8}{-8 - \frac{(-8 + 6,808) \cdot 1}{2 \cdot \left(\frac{1}{0,163} + 1 \right)}} \cdot \left(1^2 + \frac{2 \cdot 1}{0,163} \right) \right]$$

$$= 2,382 \cdot 10^3 \text{ (с)}.$$

$$\tau_{\text{общ}} = 1,061 \cdot 10^3 + 2,382 \cdot 10^3 = 3,443 \cdot 10^3 \text{ (с)}.$$

При моделировании проведены расчёты для скоростей воздуха над поверхностью продукта: $\omega=1,0$ м/с; $\omega=1,5$ м/с; $\omega=3,0$ м/с. При переменном расстоянии от поверхности до

термического центра: $R=0,01$ м; $R=0,015$ м; $R=0,02$ м. И длине поверхности продукта в направлении потока воздуха: $\delta=0,1$ м; $\delta=0,125$ м; $\delta=0,15$ м.

В результате получено, что если скорость воздуха у поверхности продукта будет $1,5$ м/с, то время заморозки свежего тощего мяса с начальной температуры у поверхности продукта $+10^{\circ}\text{C}$ до конечной температуры у поверхности продукта -8°C будет составлять $3,443 \cdot 10^3$ с. Если увеличить скорость воздуха у поверхности продукта до $3,0$ м/с, то время заморозки уменьшится и будет составлять $2,941 \cdot 10^3$ с для $R = 0,015$ м и $\delta = 0,125$ м [21]. Итоговые результаты моделирования процесса охлаждения и замораживания приведены в табл. 1, 2 и на рис. 2, 3.

Таблица 1. Зависимость времени процесса охлаждения с замораживанием продукта от скорости воздуха у поверхности продукта и расстояния от поверхности продукта до термического центра

Table 1. The dependence of the time of the cooling process with the freezing of the product on the air velocity at the surface of the product and the distance from the surface of the product to the thermal center

$\omega \backslash R$	0,01 м	0,015 м	0,02 м
1,0 м/с	$\tau = 77720$ с	$\tau = 92680$ с	$\tau = 107000$ с
1,5 м/с	$\tau = 176900$ с	$\tau = 211300$ с	$\tau = 244200$ с
3,0 м/с	$\tau = 287000$ с	$\tau = 342700$ с	$\tau = 396300$ с

Таблица 2. Зависимость времени процесса охлаждения с замораживанием продукта от скорости воздуха у поверхности продукта и длины поверхности продукта в направлении потока воздуха

Table 2. The dependence of the time of the cooling process with the freezing of the product on the air velocity at the surface of the product and the length of the product surface in the direction of the air flow

$\omega \backslash \delta$	0,1 м	0,125 м	0,15 м
1,0 м/с	$\tau = 77720$ с	$\tau = 79110$ с	$\tau = 80890$ с
1,5 м/с	$\tau = 176900$ с	$\tau = 178500$ с	$\tau = 180500$ с
3,0 м/с	$\tau = 287000$ с	$\tau = 288600$ с	$\tau = 290800$ с

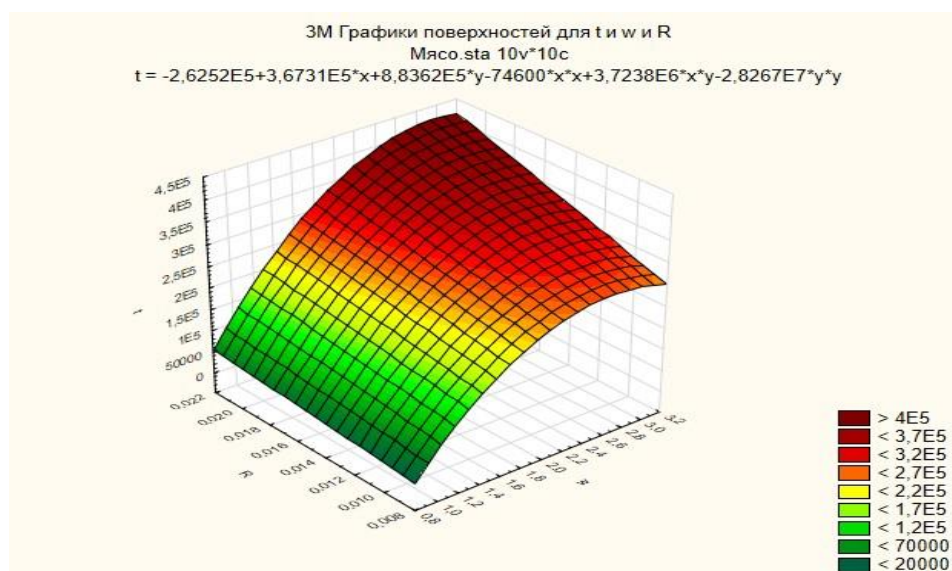


Рис. 2. График поверхностей зависимости времени процесса охлаждения с замораживанием продукта от скорости воздуха у поверхности продукта и расстояния от поверхности продукта до термического центра

Fig. 2. Graph of surfaces of the dependence of the time of the cooling process with freezing of the product on the air velocity at the surface of the product and the distance from the surface of the product to the thermal center

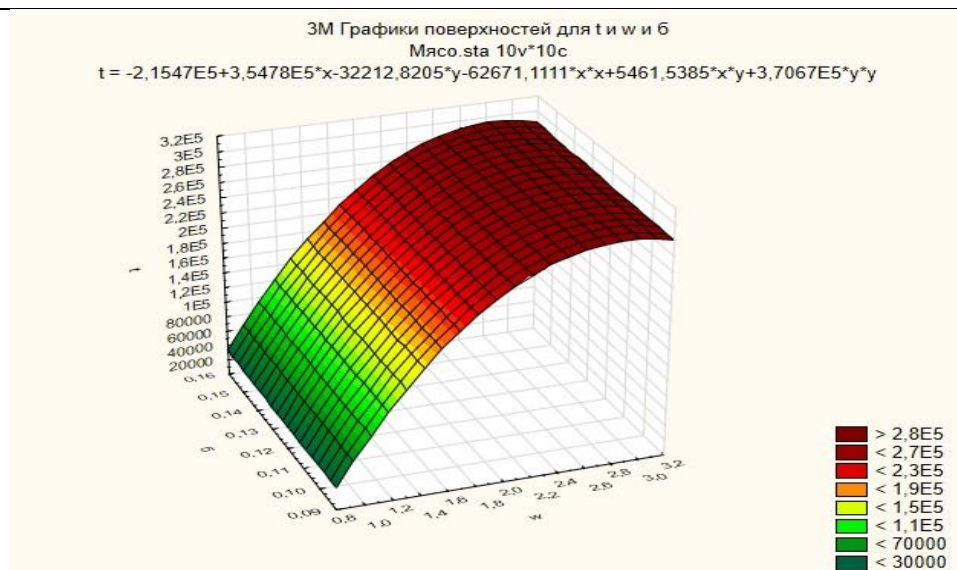


Рис. 3. График поверхностей зависимости времени процесса охлаждения с замораживанием от продукта скорости воздуха у поверхности продукта и длины поверхности продукта в направлении потока воздуха

Fig. 3. Graph of surfaces of the dependence of the time of the process of cooling with freezing on the product of the air speed at the surface of the product and the length of the product surface in the direction of air flow

Вывод. Учитывая начальные и конечные условия процесса охлаждения и замораживания, модель и стенд позволяют достаточно точно определять продолжительность холодильного воздействия, как для мяса, так и для любых других пищевых продуктов в целом, выявлять оптимальные значения и режимы для различных пищевых продуктов. Также нужно знать характеристики холодильного оборудования и в данном примере, если увеличить скорость воздуха у поверхности продукта до 3 м/с, то получим сокращение времени на 502 с при условии $R = 0,015$ м и $\delta = 0,125$ м.

Библиографический список:

1. Жлобо Р.А., Степанова Е.Г., Бзегежев А.З. Зависимость коэффициента сжимаемости фтортрихлорметана от давления при различных температурах // Электронный сборник научных статей по материалам третьей международной научно-практической конференции. Краснодар, 2020. 909-913 с.
2. Жлобо Р.А., Степанова Е.Г., Гармаш А.П. Зависимость коэффициента сжимаемости трифтортрихлорэтана от давления при различных температурах // Электронный сборник научных статей по материалам третьей международной научно-практической конференции. Краснодар, 2020. 893-897 с.
3. Зависимость коэффициента сжимаемости трифторметана от давления при различных температурах / Р. А. Жлобо, Е. Г. Степанова, А. Ю. Трудников [и др.] // Механика, оборудование, материалы и технологии: 4 международная научно-практическая конференция, Краснодар, 25–26 ноября 2021 года. – Краснодар: Общество с ограниченной ответственностью "ПринтТерра", 2021. – С. 494-502.
4. Зависимость коэффициента сжимаемости тетрафторэтана от давления при различных температурах / Р. А. Жлобо, Е. Г. Степанова, И. Е. Полушкин [и др.] // Механика, оборудование, материалы и технологии: 4 международная научно-практическая конференция, Краснодар, 25–26 ноября 2021 года. – Краснодар: Общество с ограниченной ответственностью "ПринтТерра", 2021. – С. 472-480.
5. Зависимость коэффициента сжимаемости тетрафторметана от давления при различных температурах / Р. А. Жлобо, Е. Г. Степанова, О. А. Пятыхин [и др.] // Механика, оборудование, материалы и технологии: 4 международная научно-практическая конференция, Краснодар, 25–26 ноября 2021 года. – Краснодар: Общество с ограниченной ответственностью "ПринтТерра", 2021. – С. 465-472.
6. Зависимость коэффициента сжимаемости тетрафтордихлорэтана от давления при различных температурах / Р. А. Жлобо, Е. Г. Степанова, Н. Д. Капитанов [и др.] // Механика, оборудование, материалы и технологии: 4 международная научно-практическая конференция, Краснодар, 25–26 ноября 2021 года. – Краснодар: Общество с ограниченной ответственностью "ПринтТерра", 2021. – С. 457-465.

7. Зависимость коэффициента сжимаемости дихлорфторметана от давления при различных температурах / Р. А. Жлобо, Е. Г. Степанова, М. П. Тихомиров [и др.] // Механика, оборудование, материалы и технологии: 4 международная научно-практическая конференция, Краснодар, 25–26 ноября 2021 года. – Краснодар: Общество с ограниченной ответственностью "ПринтТерра", 2021. – С. 276-284.
8. Зависимость коэффициента сжимаемости дифтордихлорметана от давления при различных температурах / Р. А. Жлобо, Е. Г. Степанова, А. Е. Лебедев [и др.] // Механика, оборудование, материалы и технологии: 4 международная научно-практическая конференция, Краснодар, 25–26 ноября 2021 года. – Краснодар: Общество с ограниченной ответственностью "ПринтТерра", 2021. – С. 268-276.
9. Зависимость коэффициента сжимаемости хлордифторметана от давления при различных температурах / Р. А. Жлобо, Е. Г. Степанова, И. В. Томашев [и др.] // Механика, оборудование, материалы и технологии: 4 международная научно-практическая конференция, Краснодар, 25–26 ноября 2021 года. – Краснодар: Общество с ограниченной ответственностью "ПринтТерра", 2021. – С. 486-494.
10. Зависимость коэффициента сжимаемости трифторхлорметана от давления при различных температурах / Р. А. Жлобо, Е. Г. Степанова, Р. В. Масленников [и др.] // Механика, оборудование, материалы и технологии: 4 международная научно-практическая конференция, Краснодар, 25–26 ноября 2021 года. – Краснодар: Общество с ограниченной ответственностью "ПринтТерра", 2021. – С. 502-510.
11. Зависимость коэффициента сжимаемости оксафторциклобутана от давления при различных температурах / Р. А. Жлобо, Е. Г. Степанова, Г. Г. Черненко [и др.] // Механика, оборудование, материалы и технологии: 4 международная научно-практическая конференция, Краснодар, 25–26 ноября 2021 года. – Краснодар: Общество с ограниченной ответственностью "ПринтТерра", 2021. – С. 338-344.
12. Зависимость коэффициента сжимаемости пропилена от давления при различных температурах / Р. А. Жлобо, М. В. Шамаров, Д. Р. Мойдинов [и др.] // Инновационные направления интеграции науки, образования и производства: сборник материалов III Международной научно-практической конференции, Керчь, 11–15 мая 2022 года. – Керчь: ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет», 2022. – С. 40-43.
13. Зависимость коэффициента сжимаемости пропана от давления при различных температурах / Р. А. Жлобо, А. В. Гукасян, А. А. Султанов [и др.] // Инновационные направления интеграции науки, образования и производства: сборник материалов III Международной научно-практической конференции, Керчь, 11–15 мая 2022 года. – Керчь: ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет», 2022. – С. 53-56.
14. Зависимость коэффициента сжимаемости метана от давления при различных температурах / Р. А. Жлобо, Е. Г. Степанова, С. Ю. Ропот [и др.] // Инновационные направления интеграции науки, образования и производства: сборник материалов III Международной научно-практической конференции, Керчь, 11–15 мая 2022 года. – Керчь: ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет», 2022. – С. 57-60.
15. Расчет и проектирование сопла Лавала / Ю. С. Беззаботов, Р. А. Жлобо, Д. Р. Мойдинов, Е. Г. Степанова // Инновационные направления интеграции науки, образования и производства: Сборник тезисов докладов участников I Международной научно-практической конференции, Керчь, 14–17 мая 2020 года / Под общей редакцией Е.П. Масюткина. – Керчь: ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет», 2020. – С. 172-175.
16. Приборы и техника низкотемпературных систем: учеб. пособие / Е.Г. Степанова, Б.Ю. Орлов, Р.А. Жлобо. – Краснодар: Изд. ФГБОУ ВО «КубГТУ», 2021. – 291 с.
17. Жлобо, Р. А. Зависимость коэффициента сжимаемости дифторэтана от давления при различных температурах / Р. А. Жлобо, И. Е. Сязин, А. Г. Биденко // Молодежь и наука : Материалы XVIII международной научно-практической конференции старшеклассников, студентов и аспирантов. В 2-х томах, Нижний Тагил, 27 мая 2022 года. Том 1. – Нижний Тагил: Нижнетагильский технологический институт - филиал Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования "Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина", 2022. – С. 34-36.
18. 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.
19. 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.
20. Андреев, И. А. Перспективы применения углекислотных холодильных машин в системах холодообеспечения / И. А. Андреев, 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. 518-526.

21. Научно-технические достижения и перспективы института механики, робототехники, инженерии транспортных и технических систем КУБГТУ в области образования и компрессоростроения / М. В. Шамаров, А. В. Гукасян, Ю. С. Беззаботов, И. Е. Сязин // Эффективное применение в проектах компрессорного, газоразделительного и энергосберегающего оборудования: Сборник трудов III-й научно-технической конференции, станица Динская, 07–08 октября 2021 года. – Краснодар: ООО "Кон-тур", 2021. – С. 53-57.

References:

1. Zhlobo R.A., Stepanova E.G., Bzegezhev A.Z. "Dependence of the compressibility factor of fluorotrichloromethane on pressure at different temperatures". *Electronic collection of scientific articles based on the materials of the third international scientific and practical conference*. Krasnodar. 2020; 909-913[In Russ]
2. Zhlobo R.A., Stepanova E.G., Garmash A.P. "Dependence of the compressibility coefficient of trifluorotrichloroethane on pressure at different temperatures". *Electronic collection of scientific articles based on the materials of the third international scientific and practical conference*/ Krasnodar. 2020; 893-897 [In Russ]
3. Dependence of the compressibility coefficient of trifluoromethane on pressure at different temperatures. R. A. Zhlobo, E. G. Stepanova, A. Yu. , Krasnodar, November 25–26, 2021. - Krasnodar: PrintTerra Limited Liability Company, 2021;494-502. [In Russ]
4. Dependence of the compressibility coefficient of tetrafluoroethane on pressure at different temperatures. R. A. Zhlobo, E. G. Stepanova, I. E. Polushkin [et al.]. *Mechanics, Equipment, Materials and Technologies: 4th international scientific and practical conference*, Krasnodar, November 25–26, 2021. - Krasnodar: PrintTerra Limited Liability Company, 2021;472-480. [In Russ]
5. Dependence of the compressibility coefficient of tetrafluoromethane on pressure at different temperatures. R. A. Zhlobo, E. G. Stepanova, O. A. Pyatyshin [et al.]. *Mechanics, equipment, materials and technologies: 4th international scientific and practical conference* , Krasnodar, November 25–26, 2021. - Krasnodar: PrintTerra Limited Liability Company, 2021; 465-472. [In Russ]
6. Dependence of the compressibility coefficient of tetrafluorodichloroethane on pressure at different temperatures. R. A. Zhlobo, E. G. Stepanova, N. D. Kapitanov [et al.]. *Mechanics, equipment, materials and technologies: 4th international scientific and practical conference* , Krasnodar, November 25–26, 2021. - Krasnodar: PrintTerra Limited Liability Company, 2021; 457-465. [In Russ]
7. Dependence of the compressibility coefficient of dichlorofluoromethane on pressure at different temperatures / R. A. Zhlobo, E. G. Stepanova, M. P. Tikhomirov [et al.]. *Mechanics, equipment, materials and technologies: 4th international scientific and practical conference* , Krasnodar, November 25–26, 2021. - Krasnodar: PrintTerra Limited Liability Company, 2021. - P. 276-284. [In Russ]
8. Dependence of the compressibility coefficient of difluorodichloromethane on pressure at different temperatures / R. A. Zhlobo, E. G. Stepanova, A. E. Lebedev [et al.]. *Mechanics, Equipment, Materials and Technologies: 4th international scientific and practical conference* , Krasnodar, November 25–26, 2021. - Krasnodar: PrintTerra Limited Liability Company, 2021; 268-276. [In Russ]
9. Dependence of the compressibility coefficient of chlorodifluoromethane on pressure at different temperatures / R. A. Zhlobo, E. G. Stepanova, I. V. Tomashev [et al.] *Mechanics, equipment, materials and technologies: 4th international scientific and practical conference* , Krasnodar, November 25–26, 2021. - Krasnodar: PrintTerra Limited Liability Company, 2021; 486-494. [In Russ]
10. Dependence of the compressibility coefficient of trifluorochloromethane on pressure at different temperatures. R. A. Zhlobo, E. G. Stepanova, R. V. Maslennikov [et al.]. *Mechanics, equipment, materials and technologies: 4th international scientific and practical conference* , Krasnodar, November 25–26, 2021. - Krasnodar: PrintTerra Limited Liability Company, 2021;502-510. [In Russ]
11. Dependence of the compressibility coefficient of oxafuorocyclobutane on pressure at different temperatures. R. A. Zhlobo, E. G. Stepanova, G. G. Chernenko [et al.]. *Mechanics, equipment, materials and technologies: 4th international scientific and practical conference* , Krasnodar, November 25–26, 2021.- Krasnodar: PrintTerra Limited Liability Company, 2021; 338-344. [In Russ]
12. Dependence of the propylene compressibility coefficient on pressure at different temperatures / R. A. Zhlobo, M. V. Shamarov, D. R. Moidinov [et al.] // *Innovative directions of integration of science, education and production: collection of materials of the III International Scientific -practical conference*, Kerch, May 11–15, 2022. Kerch: FGBOU VO "Kerch State Marine Technological University", 2022; 40-43. [In Russ]
13. Dependence of the propane compressibility coefficient on pressure at different temperatures / R. A. Zhlobo, A. V. Gukasyan, A. A. Sultanov [et al.]. *Innovative directions of integration of science, education and production: collection of materials of the III International Scientific -practical conference*, Kerch, May 11–15, 2022. - Kerch: FGBOU VO "Kerch State Marine Technological University", 2022; 53-56. [In Russ]
14. Dependence of the compressibility coefficient of methane on pressure at different temperatures / R. A.

- Zhlobo, E. G. Stepanova, S. Yu. -practical conference, Kerch, May 11–15, 2022. Kerch: FGBOU VO "Kerch State Marine Technological University", 2022; 57-60. [In Russ]
15. Calculation and design of the Laval nozzle / Yu. S. Bezzabotov, R. A. Zhlobo, D. R. Moidinov, E. G. Stepanova. Innovative directions for the integration of science, education and practical conference, Kerch, May 14–17, 2020 / Under the general editorship of E.P. Masyutkin. Kerch: FGBOU VO "Kerch State Marine Technological University", 2020; 172-175. [In Russ]
 16. Devices and technology of low-temperature systems: textbook. Allowance. E.G. Stepanova, B.Yu. Orlov, R.A. Redneck. - Krasnodar: Ed. FGBOU VO "KubGTU", 2021; 291. [In Russ]
 17. Zhlobo, R. A. Dependence of the compressibility coefficient of difluoroethane on pressure at different temperatures / R. A. Zhlobo, I. E. Syazin, A. G. Bidenko. *Youth and Science: Proceedings of the XVIII International Scientific and Practical Conference of High School Students, students and graduate students. In 2 volumes, Nizhny Tagil, May 27, 2022. Volume 1.* - Nizhny Tagil: Nizhny Tagil Institute of Technology - a branch of the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin", 2022; 34-36. [In Russ]
 18. Zhlobo, R. A. Dependence of ethane compressibility coefficient 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]
 19. Stepanova, E. G. Study of the fish cooling process using binary ice / E. G. Stepanova, R. A. Zhlobo, I. E. Trofimenko. *Technologies of the food and processing industry of the AIC - healthy food products.* 2022; 3: 262-266. – DOI 10.24412/2311-6447-2022-3-262-266. [In Russ]
 20. Andreev, I. A. Prospects for the use of carbon dioxide refrigeration machines in refrigeration systems / I. A. Andreev, M. V. Shamarov. Mechanics, equipment, materials and technologies: 4th international scientific and practical conference, Krasnodar, 25–26 November 2021. Krasnodar: PrintTerra Limited Liability Company, 2021; 518-526. [In Russ]
 21. Shamarov M. V., Gukasyan A. V., Bezzabotov Yu. S., Syazin I. E. Scientific and technical achievements and prospects of the Institute of Mechanics, Robotics, Engineering of Transport and Technical Systems of KUBGTU. Effective application in projects of compressor, gas separation and energy-saving equipment: Proceedings of the III scientific and technical conference, Dinskaya village, October 07–08, 2021. - Krasnodar: Kontur LLC, 2021; 53-57. [In Russ]

Сведения об авторах:

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

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

Алёшин Владимир Иванович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологического оборудования и систем жизнеобеспечения; vladimir01121946@mail.ru

Сведения об авторах:

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

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

Vladimir I. Alyoshin, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Assoc. Prof., Department of Technological Equipment and Life Support Systems; vladimir01121946@mail.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 22.12.2022.

Одобрена после рецензирования/ Reved 27. 01.2023.

Принята в печать/Accepted for publication 27.01.2023.

ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА
ENERGY AND ELECTRICAL ENGINEERING

УДК 537.322.15

DOI: 10.21822/2073-6185-2023-50-1-33-41

Оригинальная статья /Original Paper

Оптимизация термоэлектрических систем контроля температуры

А.И. Семиляк, Т.Э. Саркаров, Д.В. Евдулов, К.К. Назаров

Дагестанский государственный технический университет,

367026, г. Махачкала, пр. И. Шамиля, 70, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является разработка методов регулирования температуры с помощью элемента Пельтье в заданном диапазоне температур. **Метод.** Применен способ нагрева с использованием элемента Пельтье в устройстве контроля температуры небольшой пластины путем регулирования тока и с применением охлаждающего вентилятора для уменьшения инерционности. **Результат.** Получена методика управления элементом Пельтье для поддержания необходимой температуры, которая осуществляется с помощью метода ШИМ, генерируемым процессором ATmega2560. Н-мост на интегральной микросхеме L6203 переключает направление тока и может управлять током до 5А на элементе Пельтье с использованием сигнала ШИМ. **Вывод.** Полученный алгоритм управления обеспечивает увеличение тока нагрева на Пельтье до тех пор, пока температура не повысится до заданного высокого значения температуры, а затем, путем изменения направления тока создается ток охлаждения на элементе Пельтье пока температура медной пластины не снизится до заданной низкой температуры. При многократном повторении этой последовательности, отслеживается закономерность изменения температуры для исследования процесса нагрева и охлаждения пластины с помощью элемента Пельтье.

Ключевые слова: элемент Пельтье, эффект Зеебека, термоэлектрический элемент, термо-ЭДС, широтно-импульсная модуляция (PWM).

Для цитирования: А.И. Семиляк, Т.Э. Саркаров, Д.В. Евдулов, К.К. Назаров. Оптимизация термоэлектрических систем контроля температуры. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023; 50(1):33-41. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-1-33-41

Optimization of thermoelectric temperature control systems

A.I. Semilyak, T.E. Sarkarov, D.V. Evdulov, K.K. Nazarov

Daghestan State Technical University,

70 I. Shamilya Ave., Makhachkala 367026, Russia

Abstract. Objective. The aim of the study is to study the methods of temperature control using the Peltier element in a given temperature range. **Method.** A heating method is applied using a Peltier element in a temperature control device of a small plate by regulating the current and using a cooling fan to reduce inertia. **Result.** A technique for controlling the Peltier element to maintain the required temperature is obtained, which is carried out using the PWM method generated by the ATmega2560 processor. The H-bridge on the L6203 integrated circuit switches the current direction and can control the current up to 5A on the Peltier element using a PWM signal. **Conclusion.** The resulting control algorithm provides an increase in the heating current on the Peltier until the temperature rises to a predetermined high temperature value, and then by changing the direction of the current, a cooling current is created on the Peltier element until the temperature of the copper plate drops to a predetermined low temperature. With repeated repetition of this sequence, the regularity of temperature changes is monitored to study the process of heating and cooling the plate using the Peltier element.

Keywords: Peltier element, Seebeck effect, thermoelectric element, thermo-EMF, pulse width modulation (PWM).

For citation: A.I. Semilyak, T.E. Sarkarov, D.V. Evdulov, K.K. Nazarov. Optimization of thermoelectric temperature control systems. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science. 2023; 50 (1): 33-41. DOI: 10.21822 /2073-6185-2023-50-1-33-41

Введение. Развитие современных технологий тесно связано с поиском новых источников электрической энергии. Если раньше главным требованием являлось увеличение объема выработки электрической энергии, то в настоящее время на передний план выходит требование выработки возобновляемой энергии экологически чистым путем. В настоящее время усилия ученых и технологов направлены на развитие возобновляемой энергетики, в которой остро нуждаются все страны [1].

Явление термоэлектрического эффекта заключается в генерировании термоэлектродвижущей силы, которая возникает из-за разности температур между двумя соединениями различных металлов, образующих часть одной и той же цепи. В таких устройствах генерации электрической энергии тепловая энергия непосредственно преобразуется в электрическую энергию, промежуточное звено в виде механической энергии в них отсутствует, что выгодно отличает их от обычных электроэнергетических систем. Большое количество отработавшей тепловой энергии в виде тепловых потоков в промышленности и сфере ЖКХ просто выбрасывается в окружающую среду без ее дальнейшего использования.

Элемент Пельтье является простейшим термоэлектрическим преобразователем тепловой энергии в электрическую, и наиболее эффективным инструментом для создания установок использования тепловой энергии. Использование модулей Пельтье дает возможность прямого преобразования энергии теплового потока в электрическую энергию (твердотельные генераторы электрической энергии) и наоборот (термоэлектрические холодильники), при этом их работа в режиме генерации электрической энергии зависит только от наличия перепада температур [2].

Термоэлектрические генераторы (ТЭГ) являются экологически чистым источником электрической энергии и позволяют получить с одного генераторного модуля электрическую энергию мощностью до 40 Вт. Использование термоэлектрических модулей позволяет получить ряд преимуществ, таких как экологическая чистота, отсутствие движущихся частей, бесшумность работы, небольшой размер и вес, высокая надежность, устойчивость к механическим воздействиям, возможность работы в любом пространственном положении. Кроме того, твердотельные герметичные конструкции на основе термоэлектрических модулей (ТЭМ) позволяют отводить тепло из герметично закрытых объемов радиоэлектронной аппаратуры.

Применение модулей Пельтье в приводах на основе гидридов металлов является весьма актуальным, так как материалы на основе гидридов металлов хранят большое количество водорода и могут реализовывать преобразование энергии за счет изменения энтальпии посредством гидридной реакции. Приводные системы, использующие это особое физико-химическое свойство, называются металлгидридными приводами. Эти приводы используют механическую энергию, образованную из равновесного давления водорода, через тепловую энергию, передаваемую сплавам гидридов металлов в качестве выхода. Металлогидридные приводы обладают простой конструкцией и имеют ряд особенностей, которые делают их весьма перспективными для применения в реабилитационной технике и других вспомогательных технологиях. Они являются экологически безопасными и обеспечивают высокое отношение мощности к весу, высокое усилие срабатывания, совместимую с человеком мягкость и бесшумность. Использование металлгидридных приводов весьма полезно для общих приложений человеко-машинного интерфейса. Применение искусственных мышечных приводов на основе металлгидридов, с использованием микро-

контроллерных систем управления, для их применения в технологиях повышения качества жизни также является весьма перспективным [1,3,5].

Во многих странах проводятся исследования в области применения термоэлектрического охлаждения и выработки электроэнергии с использованием элемента Пельтье.

Постановка задачи. В данной работе исследуется регулирование температуры медной пластины с помощью элемента Пельтье в заданном диапазоне температур. Текущее управление элементом Пельтье достигается с помощью метода ШИМ с управлением параметрами с помощью обратной связи. Управление объектом с помощью ШИМ можно реализовать различными способами, например с помощью таймеров микроконтроллера или с использованием ПИД-регулятора. Система, выполняющая пропорциональное, интегрирующее и дифференциальное управление носит название системы пропорционально-интегрально-дифференциального управления, или сокращенно системы ПИД управления. Система ПИД управления добавляет в систему дополнительный вход, несущий информацию о предыдущем состоянии системы.

На рис.1 показана структурная схема системы ПИД-управления. Разница между заданной и измеряемой величинами усиливается. Производная и интеграл усиленной разности суммируются с усиленным сигналом ошибки, формируя сигнал на выходе. [2,4]

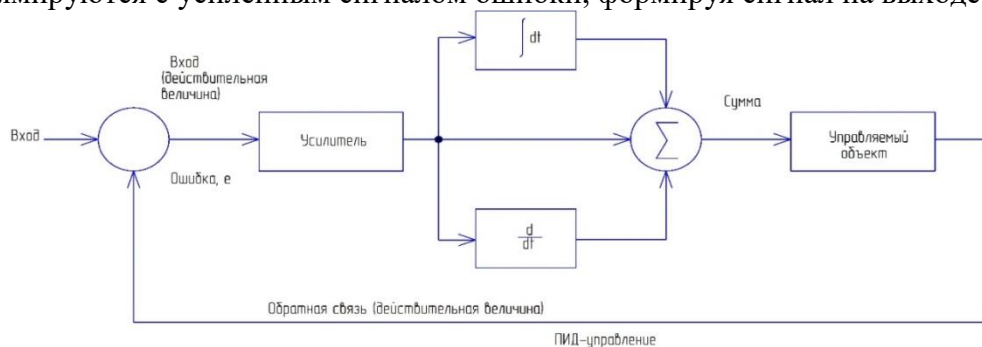


Рис.1. Система ПИД-управления

Fig.1. PID control system

Общая формула для ПИД-систем выглядит следующим образом:

$$Output = G \cdot (e + I \cdot \int edt + D \cdot \frac{de}{dt}), \quad (1)$$

где G – это усиление (Gain),

e – ошибка управления, то есть разность между требуемой и действительной величиной (error),

I – прибавляемая величина интеграла ошибки (Integral),

D – прибавляемая величина производной ошибки (Derivative).

Если I и D равны нулю, то получаем: $G \times e$, формулу пропорционального управления. Если I и D равны нулю, а G настолько велико, что выходной сигнал доходит до насыщения, получаем релейную систему управления. Как и в системах с пропорциональным регулированием, в ПИД-системах иногда требуется знать некоторое смещение, которое может в данном случае как прибавляться, так и вычитаться.

От системы с пропорционального управления, система ПИД-управления отличается дополнительными вычислениями интеграла и производной. Это уже зависимые от времени параметры: интеграл вычисляется за некоторый период времени, а производная – разность между состояниями в соседних временных интервалах [6,7].

Для управления нагревом и охлаждением пластины с применением модулей Пельтье будут использоваться элементы, управление которыми осуществляется с помощью метода широтно-импульсной модуляции цифровых выходов микроконтроллера. Использование ПИД-регулятора позволяет генерировать ШИМ сигналы в соответствии с обратной связью по входному сигналу датчика температуры. Хотя ПИД-регулирование может быть эффективно реализовано с помощью нескольких операционных усилителей, резисторов и конденсаторов, цифровое управление предлагает много преимуществ по сравне-

нию с аналоговым управлением. Микропроцессоры нечувствительны к изменениям температуры и позволяют избежать проблем, связанных со старением и дрейфом. Цифровое управление также позволяет легко и точно настраивать контроллер в программном обеспечении, в отличие от более трудоемкой и менее воспроизводимой настройки аналогового управления. Это также означает, что один контроллер можно спроектировать и использовать на нескольких платформах без необходимости значительных изменений компонентов и перепроектирования. Низкие требования к пропускной способности контроллера означают, что можно использовать микроконтроллер с низкой производительностью [8,9,10].

Алгоритм ПИД обеспечивает быструю реакцию с обратной связью на ступенчатые изменения температуры и гарантирует, что конечная температура пластины будет соответствовать заданному значению температуры, а также снижает переходные выбросы и колебания температуры при изменении заданного значения с одного значения на другое.

Элемент Пельтье используется в устройстве контроля температуры небольшой пластины путем регулирования тока и с использованием охлаждающего вентилятора для уменьшения инерционности. Устройство должно обеспечивать в течение 1 минуты увеличение температуры от 25 °C до 73 °C и затем уменьшать ее от 73 °C до 43 °C при температуре окружающего воздуха 25 °C [11,15,16]. Если между двумя металлами возникает разность электрических потенциалов, то электроны в металлах начинают двигаться и кинетическая энергия электрона преобразуется в тепловую в элементе Пельтье. Элемент Пельтье может передавать тепло между двумя металлами при протекании тока и наоборот, (эффект Зеебека) если есть разница температур, то ток течет между двумя металлами. Если полупроводник n-типа подключен к плюсу, а полупроводник p-типа, подключен к минусу, то течет ток от полупроводника n-типа к полупроводнику p-типа, и это приводит к поглощению тепла от нижнего бокового электрода и отводу тепла к верхнему боковому электроду.

Величина тепловой передачи элемента Пельтье пропорциональна зарядному току и определяется уравнением (2).

$$Q = \pi I \quad (2)$$

где π – коэффициент Пельтье, связанный с охлаждением и теплоемкостью на стыке металла.

Если температура горячей стороны равна T_h , а температура холодной стороны равна T_c , то теплота, выделяемая на горячей стороне, равна $\alpha_e I T_h$, а теплота, поглощаемая на холодной стороне – это $\alpha_e I T_c$, где α_e – итоговый коэффициент Зеебека, то есть сумма коэффициентов p, n полупроводника $\alpha_e = (\alpha_p + |\alpha_n|)$. Если ток I поступает на элемент Пельтье, то тепло, выделяемое в связи с эффектом Джоуля, равно $I^2 r_e$, где r_e – сумма омических сопротивлений p-n полупроводника $r_e = (r_p + r_n)$.

Предполагается, что половина тепла Джоуля течет на горячую сторону и холодную сторону соответственно. Если суммирование теплопроводности p-n полупроводника равно $k_e = (k_p - k_n)$, то тепло передается от горячей стороны к холодной стороне как количество $k_e(T_h - T_c)$. Если n – количество модулей термоэлектрического охладителя в Элемент Пельтье, то поглощение тепла на низкотемпературной стороне определяется уравнением (3), а тепловыделение на горячей стороне определяется уравнением (4).

$$|Q_c| = n \left\{ \alpha_e I T_c - \frac{I^2 r_e}{2} - k_e (T_h - T_c) \right\}, \quad (3)$$

$$|Q_h| = n \left\{ \alpha_e I T_h - \frac{I^2 r_e}{2} - k_e (T_h - T_c) \right\}, \quad (4)$$

Коэффициент производительности (COP) элемента Пельтье определяется по уравнению (5)

$$COP = \frac{Q_c}{W} = \frac{\alpha_e I T_c - \frac{I^2 r_e}{2} - k_e \Delta T_{hc}}{I^2 r_e + \alpha_e I T_{hc}} \quad (5)$$

Методы исследования. Управление элементом Пельтье осуществляется с помощью метода ШИМ, которая генерируется процессором ATmega2560, а Н-мост на интегральной микросхеме L6203 или L298 переключает направление тока и может управлять током от 4А до 5А на элементе Пельтье с использованием сигнала ШИМ. Шунт с сопротивлением 0,1 Ом последовательно подключен к мосту L6203 и снятое с него напряжение усиливается ОУ К140УД22 с коэффициентом усиления 20...30 и затем выпрямляется LC-фильтром.

Таким образом, измеренный ток поступает в аналоговый входной порт микропроцессора, который сравнивает его значение с эталонным значением. Резонансная частота LC-фильтра равна $f=1/2\pi(LC)^{1/2} = 91,8$ Гц и примерно в десять раз меньше, чем частота ШИМ 0,976 кГц, что позволяет преобразовывать импульс ШИМ в постоянное напряжение при значении сопротивления демпфирования $R=180$ Ом.

Цифровой датчик температуры DS18B20 используется для измерения температуры медной пластины, измеренное значение температуры в качестве сигнала обратной связи подается по цифровому входу на порт ATmega2560. Технические характеристики датчика температуры и модуля Пельтье приводятся в табл. 1.

Таблица 1. Технические характеристики датчика температуры и модуля Пельтье

Table 1. Specifications of temperature sensor and Peltier module

Элемент Пельтье Peltier element		Датчик температуры Temperature sensor	
TEC1-12705		DS18B20	
Размер (мм) Size (mm)	40×40×3,6	Диапазон Range	-55°C÷125°C
Максимальное напряжение питания Maximum supply voltage	15,4 В	Точность Accuracy	±0,5 °C (в пределах -10... +85 °C)
Номинальная сила тока Rated current	5 А	Интерфейс Interface	1-Wire
Максимальная разность температур Maximum temperature difference	60°C	Разрешение Permission	9/10/11/12 бит

ATmega2560 получает сигналы измеренных значений температуры и тока и генерирует ШИМ сигнал для управления током элемента Пельтье, а также генерирует сигналы для контроля направления тока и для управления вентилятором ВКЛ/ВЫКЛ с запрограммированной схемой и временем выборки 0,1 сек. Блок-схема экспериментальной установки приведена на рис.2.

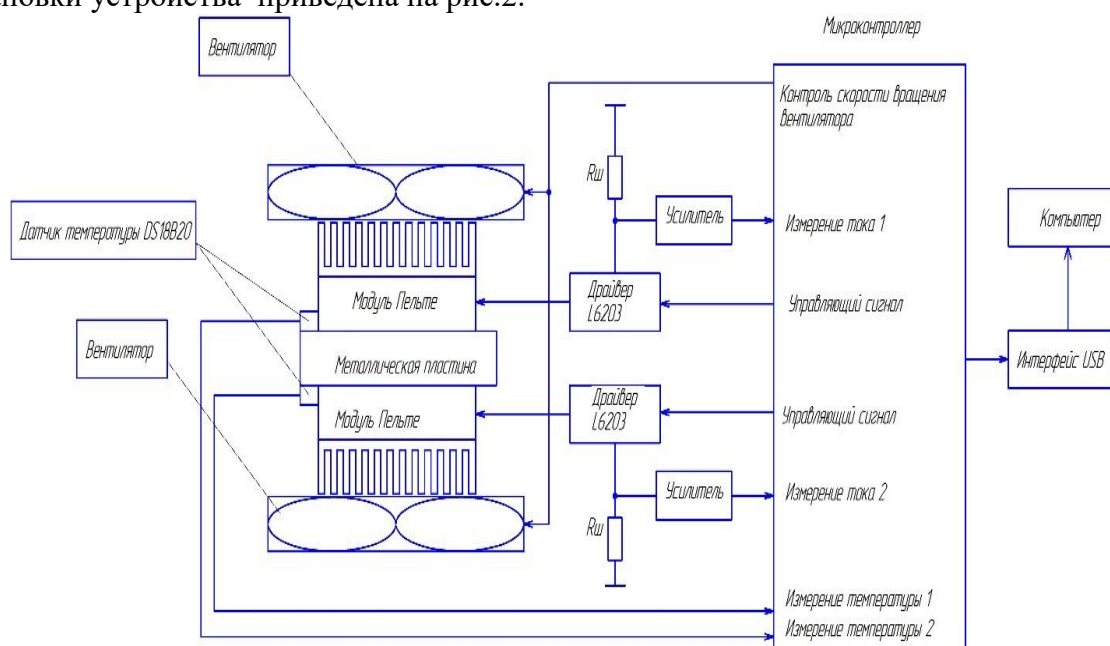


Рис. 2. Блок-схема экспериментальной установки

Fig. 2. Block diagram of the experimental setup

Схема контроля и управления устройством для управления двумя элементами Пельтье приведена на рис. 3 и содержит два одинаковых функциональных узла.

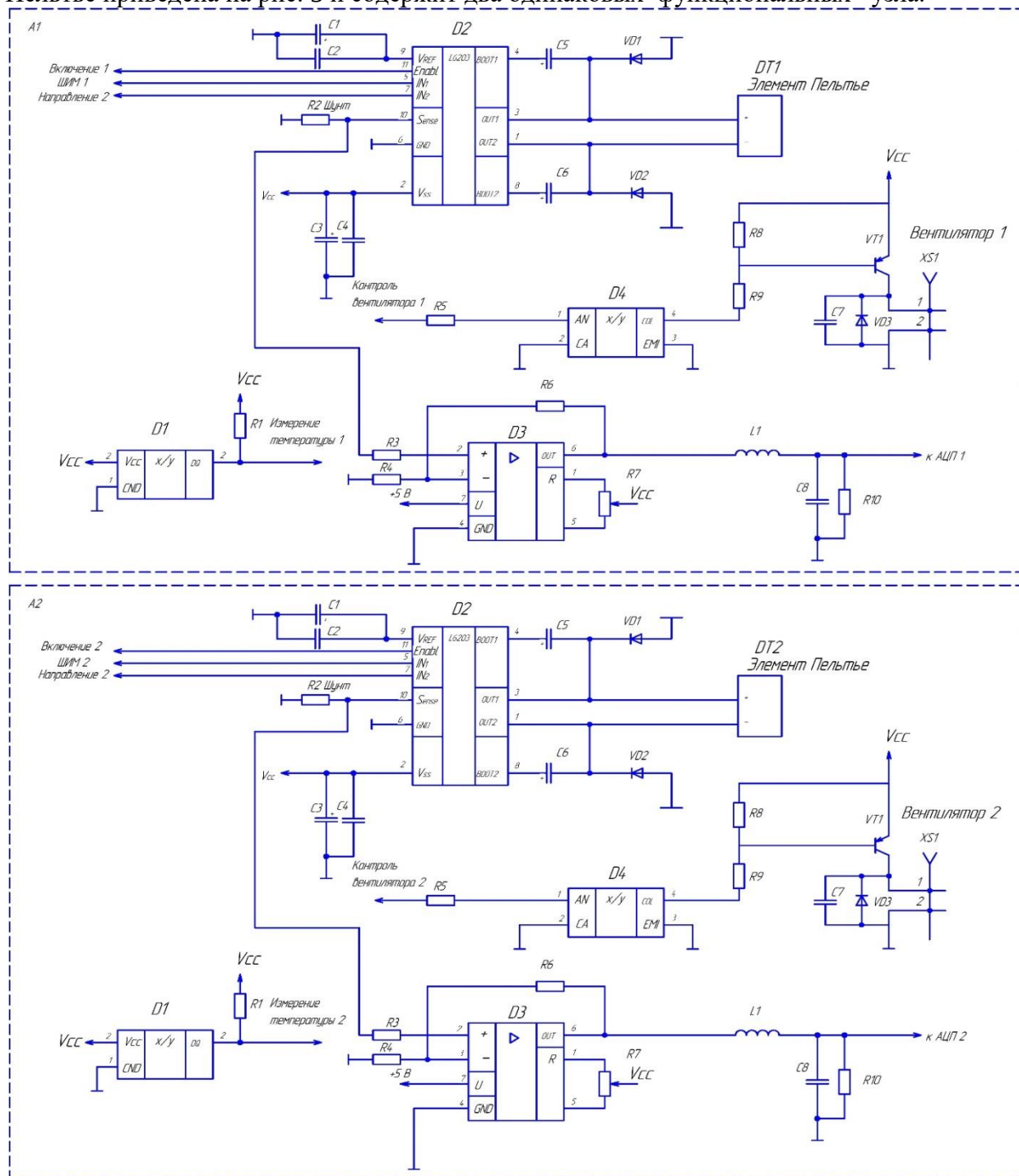


Рис.3. Схема системы управления
Fig.3. Control System Diagram

Каждый функциональный узел содержит Н-мост, усилитель сигнала, LC-фильтр для выпрямления считываемого импульсного тока ШИМ и схему управления вентилятором. Схема управления обеспечивает увеличение тока нагрева на Пельтье до тех пор, пока температура медной пластины не повысится до заданного высокого значения температуры, а затем путем изменения направления тока создается ток охлаждения на элементе Пельтье (при работающем охлаждающем вентиляторе) пока температура медной пластины не снизится до заданной низкой температуры. При многократном повторении этой последовательности, отслеживается закономерность изменения температуры для исследования процесса нагрева и охлаждения медной пластины с помощью элемента Пельтье.

Полученные экспериментальные данные отправляются в ПК через интерфейс последовательной связи USB и персональный компьютер сохраняет экспериментальные данные на жестком диске [12-14].

Обсуждение результатов. Результаты контроля температуры от 43 °С до 73 °С показаны на рис. 4 с током нагрева 3,0 А и током охлаждения 0,0 А при этом охлаждающий вентилятор работает только во время охлаждения. Повторяющийся период с температурой в диапазоне от 43 °С до 73 °С составляет около 85 секунд. Когда температура медной пластины достигает заданной высокой температуры, ток переключается в противоположном направлении, а ток охлаждения протекает через элемент Пельтье при работающем охлаждающем вентиляторе, пока температура медной пластины не уменьшится до заданной низкой температуры.

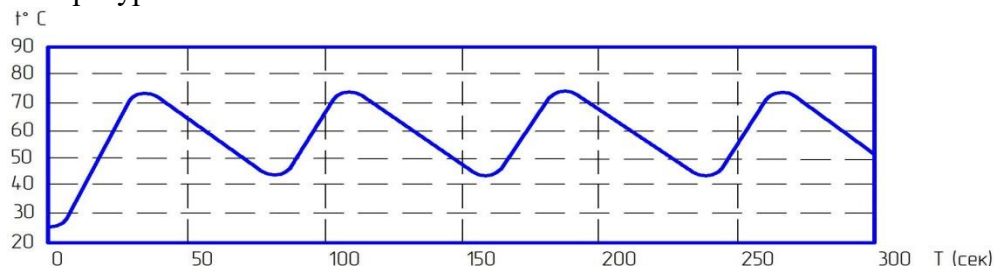


Рис. 4. Контроль температуры от 43°C до 73°C

Fig. 4. Temperature control from 43°C to 73°C

Вывод. В схеме устройства применяется широтно-импульсная модуляция с использованием обратной связи для управления длительностью импульса в соответствии с заданным алгоритмом. Контроль температуры медной пластины с помощью элемента Пельтье осуществлялся при заданной высокой и низкой температуре. Повторяющиеся периоды зависят от величины тока, а период составляет от 80 сек до 90 сек.

При реализации более быстрого периода контроля температуры этот метод контроля температуры можно применять в специальных металлгидридных приводах, которые действуют в низкочастотном диапазоне с использованием элемента Пельтье для нагрева и охлаждения. Металлогидридные приводы характеризуются меньшими размерами, меньшим весом, бесшумной работой и податливостью, аналогичной податливости человеческого тела.

Такой привод состоит из порошкообразных сплавов, поглощающих водород, в качестве источника механической энергии, элементов Пельтье в качестве источника тепла и цилиндра с металлическим сильфоном в качестве механического элемента. Узел медных труб, обладающий хорошей теплопроводностью, содержит сплавы, поглощающие водород.

Поглощающие водород сплавы могут обратимо поглощать и десорбировать большой объем водорода, более чем в тысячу раз превышающий их собственный объем. Привод использует обратимые реакции между тепловой энергией и механической энергией сплавов, поглощающих водород. Изучение характеристик привода для различных температур, давлений и внешних нагрузок позволит использовать такой тип привода в медицинских и реабилитационных целях.

Библиографический список:

1. Медведев Д.М. Структуры и алгоритмы обработки данных в системах автоматизации и управления : учебное пособие / Медведев Д.М.. - Москва : Ай Пи Ар Медиа, 2023. - 120 с.- ISBN 978-5-4497-1873-0. - Текст : электронный // IPR SMART : [сайт]. - URL: <https://www.iprbookshop.ru/127572.html>.
2. Жмудь В.А. Системы автоматического управления. Новые концепции и структуры регуляторов : учебник / Жмудь В.А., Димитров Л.В., Носек Я.. - Москва : Ай Пи Ар Медиа, 2023. - 158 с. - ISBN 978-5-4497-1876-1. - Текст : электронный // IPR SMART : [сайт]. - URL: <https://www.iprbookshop.ru/127571.html>.
3. Ким К.К. Электрические измерения неэлектрических величин : учебное пособие / Ким К.К., Анисимов Г.Н., Ткачук А.А.. - Москва : Ай Пи Ар Медиа, 2023. - 144 с.— ISBN 978-5-4497-1881-5. - Текст : электронный // IPR SMART : [сайт]. - URL: <https://www.iprbookshop.ru/127578.html>.

4. Лепявко А.П. Контактные средства измерений температуры : учебное пособие / Лепявко А.П.. - Москва : Академия стандартизации, метрологии и сертификации, 2022. - 88 с. - ISBN 978-5-93088-216-2. - Текст : электронный // IPR SMART : [сайт]. - URL: <https://www.iprbookshop.ru/126032.html>.
5. Лысенко, В. Г. Микропроцессорные информационно-управляющие системы : учебное пособие / В. Г. Лысенко, О. В. Кубкина. - Ростов-на-Дону : РГУПС, 2019. - 70 с. - ISBN 978-5-907494-05-3. - Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. - URL: <https://e.lanbook.com/book/261956>.
6. Трофименко, В. Н. Микропроцессорные информационно-управляющие системы связи : учебное пособие / В. Н. Трофименко. - Ростов-на-Дону : РГУПС, 2019. - 120 с. - ISBN 978-5-88814-904-1. - Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. - URL: <https://e.lanbook.com/book/134040>.
7. Кузнецов, Е. Н. Элементная база и функциональные узлы информационно-измерительных и управляющих систем : учебное пособие / Е. Н. Кузнецов. - Пенза : ПГУ, 2019.- 348 с. - ISBN 978-5-907102-89-7. - Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. - URL: <https://e.lanbook.com/book/162234>.
8. Деулин, Б. И. Элементная база электроники : учебное пособие / Б. И. Деулин. - Орел : ОрелГАУ, 2013. - 131 с. - Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. - URL: <https://e.lanbook.com/book/71395>.
9. Мирина, Т. В. Функциональные электронные узлы измерительных и диагностических систем : учебное пособие / Т. В. Мирина, Н. В. Мишин. - 3-е изд. - Москва : ФЛИНТА, 2012.- 271 с. - ISBN 978-5-9765-1518-5. - Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. - URL: <https://e.lanbook.com/book/60734>.
10. Бусурин, В. И. Основы получения информации в измерительных и управляющих системах : учебное пособие / В. И. Бусурин, Н. А. Макаренкова, Л. А. Шлеенкин. - Москва : МАИ, 2022. - 102 с. - ISBN 978-5-4316-0890-2. - Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. - URL: <https://e.lanbook.com/book/298583>.
11. W. S. Jeon, D. Y. Pang, K. H. Choi, T. K. Kwon, N. G. Kim and S. C. Lee, "Temperature control of aluminum plate using Peltier element," Proceedings of KSPE 2004, pp.764-767, October, 2004.(in Korean).
12. W. S. Jeon, D. Y. Pang, K. H. Choi, T. K. Kwon, N. G. Kim and S. C. Lee, "Temperature-pressure characteristics of SMH actuator using Peltier module," Journal of Control and Systems Engineering, Vol.7, No.1, pp.191-194, December, 2004.(in Korean).
13. Gao, Min., and Rowe, D. M., "Improved model for calculating the coefficient of performance of a Peltier module," Energy conversion & Management, Vol.41, pp.163-171, 2000.
14. Chein, Reiyu., and Huang, Guanming., "Thermo- electric cooler application in electronic cooling," Applied Thermal Engineering, Vol.24, pp. 2207- 2217, 2004.
15. Dilhaire, Stefan, Salhi, Amine, Grauby, Stephane, and Claeys, Wilfrid, "Laser Seebeck Effect Imaging(SEI) and Peltier Effect Imaging(PEI): complementary investigation methods," Microelectronics Reliability, Vol.43, pp.1609-1613, 2003.
16. Kang, B. H., Chang, H. J., Kim, S. Y., and Kim, S., "Cooling characteristics at hot side of the thermoelectric module for an air conditioner," Korea J. of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 14, No.3, pp.482-488, 2002.

References:

1. Medvedev D.M. Structures and algorithms of data processing in automation and control systems : textbook / Medvedev D.M.. - Moscow : AI Pi Ar Media, 2023; 120.- ISBN 978-5-4497-1873-0. - Text : electronic // IPR SMART : [website]. - URL: <https://www.iprbookshop.ru/127572.html>. [In Russ].
2. Zhmud V.A. Automatic control systems. New concepts and structures of regulators : textbook / Zhmud V.A., Dimitrov L.V., Nosek Ya.. - Moscow : AI Pi Er Media, 2023;158. - ISBN 978-5-4497-1876-1. - Text : electronic // IPR SMART : [website]. - URL: <https://www.iprbookshop.ru/127571.html>. [In Russ].
3. Kim K.K. Electrical measurements of non-electrical quantities : textbook / Kim K.K., Anisimov G.N., Tkachuk A.A.. - Moscow : AI Pi Er Media, 2023; 144.- ISBN 978-5-4497-1881-5. - Text : electronic // IPR SMART : [website]. - URL: <https://www.iprbookshop.ru/127578.html>. [In Russ].
4. Lepyavko A.P. Contact temperature measuring instruments : textbook / Lepyavko A.P.- Moscow : Academy of Standardization, Metrology and Certification, 2022; 88. - ISBN 978-5-93088-216-2. - Text : electronic // IPR SMART : [website]. - URL: <https://www.iprbookshop.ru/126032.html>. [In Russ].
5. Lysenko, V. G. Microprocessor information and control systems : textbook / V. G. Lysenko, O. V. Kubkina. - Rostov-on-Don : RSUPS, 2019; 70 - ISBN 978-5-907494-05-3. - Text : electronic // Lan : electronic library system. - URL: <https://e.lanbook.com/book/261956>. [In Russ].
6. Trofimenko, V. N. Microprocessor information and control communication systems : textbook / V. N. Trofimenko. - Rostov-on-Don : RSUPS, 2019; 120. - ISBN 978-5-88814-904-1. - Text : electronic // Lan : electronic library system. - URL: <https://e.lanbook.com/book/134040>. [In Russ].

7. Kuznetsov, E. N. Element base and functional nodes of information-measuring and control systems : textbook / E. N. Kuznetsov. - Penza : PSU, 2019; 348 - ISBN 978-5-907102-89-7. - Text : electronic // Lan : electronic library system. - URL: <https://e.lanbook.com/book/162234>. [In Russ].
8. Deulin, B. I. The element base of electronics: a textbook / B. I. Deulin. - Orel : OrelGAU, 2013; 131 - Text : electronic // Lan : electronic library system. - URL: <https://e.lanbook.com/book/71395>. [In Russ].
9. Mirina, T. V. Functional electronic components of measuring and diagnostic systems: textbook / T. V. Mirina, N. V. Mirin. - 3rd ed. - Moscow: FLINT, 2012; 271. - ISBN 978-5-9765-1518-5. - Text: electronic // Lan: electronic library system. - URL: <https://e.lanbook.com/book/60734>. [In Russ].
10. Busurin, V. I. Fundamentals of obtaining information in measuring and control systems: textbook / V. I. Busurin, N. A. Makarenkova, L. A. Shleenkin. Moscow : MAI, 2022; 102 - ISBN 978-5-4316-0890-2. - Text : electronic. Lan : electronic library system. - URL: <https://e.lanbook.com/book/298583>. [In Russ].
11. W. S. Jeon, D. Y. Pang, K. H. Choi, T. K. Kwon, N. G. Kim and S. C. Lee, "Temperature control of aluminum plate using Peltier element," Proceedings of KSPE 2004, pp.764-767, October, 2004 [In Korean]
12. W. S. Jeon, D. Y. Pang, K. H. Choi, T. K. Kwon, N. G. Kim and S. C. Lee, "Temperature-pressure characteristics of SMH actuator using Peltier module," *Journal of Control and Systems Engineering*, 2004; 7(1): 191-194 [In Korean]
13. Gao, Min., and Rowe, D. M., "Improved model for calculating the coefficient of performance of a Peltier module," *Energy conversion & Management*, 2000;41:163-171.
14. Chein, Reiyu., and Huang, Guanming., "Thermo- electric cooler application in electronic cooling," *Applied Thermal Engineering*, 2004; 24: 2207- 2217
15. Dilhaire, Stefan, Salhi, Amine, Grauby, Stephane, and Claeys, Wilfrid, "Laser Seebeck Effect Imaging(SEI) and Peltier Effect Imaging(PEI): complementary investigation methods," *Microelectronics Reliability*, 2003; 43:1609-1613
16. Kang, B. H., Chang, H. J., Kim, S. Y., and Kim, S., "Cooling characteristics at hot side of the thermoelectric module for an air conditioner," *Korea J. of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, 2002; 14(3):482-488

Сведения об авторах:

Семиляк Александр Иванович, старший преподаватель кафедры теоретической и общей электротехники; asemilyak@mail.ru

Саркаров Таджидин Экберович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры теоретической и общей электротехники; sarkarovta@mail.ru.

Евдулов Денис Викторович, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры теоретической и общей электротехники; evdulovdenis@yandex.ru

Назаров Кадыр Курбанович, аспирант кафедры управления и информатики в технических системах и вычислительной техники nazarov.kadi@yandex.ru

Information about authors:

Alexander I. Semilyak, Senior Lecturer of the Department of Theoretical and General Electrical Engineering; asemilyak@mail.ru

Tadzhidin E.Sarkarov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Department of Theoretical and General Electrical Engineering; sarkarovta@mail.ru.

Denis V.Evdulov, Cand. Sci. (Eng.), Senior Lecturer, Department of Theoretical and General Electrical Engineering; ole-ole-ole@rambler.ru

Kadyr K. Nazarov, Postgraduate student of the Department of Control and Informatics in Technical Systems and Computer Engineering nazarov.kadi@yandex.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 20.12.2022.

Одобрена после рецензирования/ Revised 19.01.2023.

Принята в печать/Accepted for publication 19.01.2023.

ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА
ENERGY AND ELECTRICAL ENGINEERING

УДК 621.574

DOI: 10.21822/2073-6185-2023-50-1-42-52

Оригинальная статья /Original Paper

К вопросу оптимизации рабочих характеристик спирального компрессора в составе бустерной холодильной машины на CO₂ с целью повышения ее эффективности

В.А. Пронин, А.В. Кованов, В.А. Цветков, Е.Н. Михайлова, П.А. Белов

Университет ИТМО,

197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский просп., 49, Россия

Резюме. Цель. В условиях сокращения применения хладагентов с высоким потенциалом глобального потепления повышение эффективности холодильных машин, использующих натуральные хладагенты, является весьма актуальной задачей. Так, например, цикл бустерной холодильной машины на CO₂ может быть оптимальным для сфер коммерческого холода, климатотехники и тепловых насосов, но требует адаптации к регионам с жарким климатом. Целью исследования также является и систематизация возможных способов совершенствования спиральной технологии, как залог повышения эффективности бустерных холодильных машин. Такие решения уже апробированы за счёт использования эжектора и параллельного сжатия, что повышает эффективность использования транскритического цикла. **Метод.** Применение спирального компрессора в транскритическом цикле, может являться хорошей альтернативой данным способам. Подобное решение, несколько улучшает технико-экономические показатели холодильной машины, в большей части снижая капитальные и эксплуатационные затраты. Рассматривая перспективу повышения эффективности бустерной системы со спиральным компрессором, следует обратиться к вопросу оптимизации характеристик компрессора. Данную задачу можно отнести к разряду повышения эффективности холодильной машины за счёт её внутренних характеристик. **Результат.** Рассмотрен концептуальный подход к решению данной проблемы на основе системного анализа влияния характеристик компрессора, как основного энергоёмкого элемента холодильной машины, на параметры её работы. **Вывод.** Разработка концептуальной модели позволяет идентифицировать степень влияния различных факторов на работу спирального компрессора, повысить адекватность математической модели за счёт выбора определяющих факторов, использовать необходимые методики расчёта.

Ключевые слова: спиральный компрессор, протечки, бустерная холодильная машина, транскритический цикл, CO₂

Для цитирования: В.А. Пронин, А.В. Кованов, В.А. Цветков, Е.Н. Михайлова, П.А.Белов. К вопросу оптимизации рабочих характеристик спирального компрессора в составе бустерной холодильной машины на CO₂ с целью повышения ее эффективности. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023; 50(1):42-52. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-1-42-52

To the issue of optimising the performance of a scroll compressor as part of a CO₂ booster refrigerating machine in order to increase its efficiency

V.A. Pronin, A.V. Kovanov, V.A. Tsvetkov, E.N. Mikhailova, P.A. Belov

ITMO University,

49 Kronverksky Ave., Saint Petersburg 197101, Russia

Abstract. Objective. With the decreasing use of refrigerants with a high global warming potential, increasing the efficiency of refrigeration machines using natural working fluids is a very urgent task. The CO₂ booster refrigerant cycle may be optimal for the fields of commercial refrigeration, climate engineering and heat pumps, but needs to be adapted to regions with hot climates. The purpose of the study is also to systematize possible ways to improve the spiral

technology, as a guarantee of increasing the efficiency of booster refrigeration machines. **Method.** Such solutions have already been tested by increasing the transcritical cycle efficiency through the use of an ejector and parallel compression. However, the use of a scroll compressor in the transcritical cycle may be a good alternative to these methods. This solution, a little bit improves technical and economic indexes of the refrigerating machine, in the most part reducing capital and operational costs. When considering the prospect of improving the efficiency of a booster system with scroll compressor, it is necessary to address the issue of compressor performance optimisation. An issue of this kind can be referred to improving the efficiency of the booster system, at the expense of the internal characteristics of the refrigeration machine. **Result.** Thus, in this paper, a conceptual approach is considered to solve this problem based on a system analysis of the interconnection of the compressor as the main energy-intensive element of a refrigeration machine. **Conclusion.** Development of conceptual model, allows to identify influence of various factors on scroll compressor operation and to build adequate mathematical model, to choose or develop necessary calculation methods.

Keywords: scroll compressor, leaks, booster chiller, transcritical cycle, CO₂

For citation: V.A. Pronin, A.V. Kovanov, V.A. Tsvetkov, E.N. Mikhailova, P.A. Belov. To the issue of optimising the performance of a scroll compressor as part of a CO₂ booster refrigerating machine in order to increase its efficiency. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science. 2023; 50 (1): 42-52. DOI: 10.21822 /2073-6185-2023-50-1-42-52

Введение. Использование CO₂ в качестве рабочего вещества холодильных машин (ХМ) уже достаточно апробированный вариант, причём термодинамические свойства углекислоты позволяют успешно применять её в циклах теплового насоса. Основная трансформация архитектуры холодильного оборудования с применением диоксида углерода происходит в отраслях коммерческого холода, системах климатехники, бытовом секторе там, где всё более востребованы новые решения на озонобезопасных хладагентах с низким потенциалом глобального потепления (ПГП) [1-3].

На сегодняшний день находят применение несколько схем холодильных машин, использующих CO₂, среди них: одноступенчатые, каскадные с диоксидом углерода в одной из ветвей каскада, системы с промежуточным рабочим веществом и бустерные системы [2]. Отличительной чертой бустерной холодильной машины является возможность работы на несколько температур кипения, используя всего лишь один тип хладагента. Такое решение перспективно с точки зрения оптимизации процессов и упрощения конструкции. Транскритические бустерные системы с рекуперацией тепла востребованы в условиях холодного и умеренного климата [5-7], однако их эффективность в регионах с жарким климатом требует новых решений.

Исследования [5-8], рассматривают поставленную задачу за счёт внедрения технологий эжекторов и параллельного сжатия. В 2021 г. компания Эмерсон представила новое альтернативное решение для повышения эффективности транскритического цикла бустерной ХМ, презентовав разработанный ими спиральный компрессор (СПК) для работы в закритической зоне CO₂, с технологией Dynamic Vapour Injection (DVI). Такое решение показало на 4% повышение эффективности в холодном климате, на 6% в умеренном климате и на 8% в теплом климате. Стоимость бустерной системы по данным [4] снизилась на 9%. Уменьшилась стоимость эксплуатации, так как более простые настройки системы позволяют экономить до 14% средств. Еще одним преимуществом спиральной конструкции является малая металлоёмкость, практически на 50% ниже, чем у поршневых компрессоров, снижение веса всей системы может достигать до 10%. Проектные данные были подтверждены в рамках пилотного проекта на базе магазина в Малмсбери, Великобритания. Данная информация вселяет надежду и открывает хорошие перспективы для развития спиральной технологии в направлении увеличения производительности, когда следует стремиться к сокращению потерь.

Постановка задачи. В рассматриваемой работе мы предлагаем системный подход к поставленной проблематике, который позволяет обнаружить внутренние связи между элементами ХМ и идентифицировать их влияние на внешние характеристики бустера. Тем самым, учитывая ранее изложенное в отношении СПК, рационально рассмотреть и систематизировать возможные способы совершенствования спиральной технологии, как залог повышения эффективности бустерных холодильных машин. При оценке работы СПК в составе бустерной холодильной машины, а точнее в рамках транскритического цикла, его следует рассматривать по принципу «система в системе».

Анализ источников [9-11], показал, что основные потери при работе компрессора на высоких давлениях в закритической зоне, как правило, складываются из внутренних, преимущественно вызванных протечками рабочего вещества и внешних потерь на трение. Вопрос силовых факторов и энергетических потерь был рассмотрен в работах [12,13], при этом выводы, сделанные, в работе [13], дают достаточное основание полагать о возможности решения данного вопроса на стадии проектирования. Согласно выводов из работ [9,16], процесс протечек в рабочей части СПК остаётся в достаточной степени не предсказуемым. Много работ в данной области таких как [17-19], предлагают действительно качественную модель рабочих процессов СПК, однако их недостаток может скрываться в системе допущений, которые не позволяют оценить рабочий процесс, в некоторых условиях, достаточно адекватно и получить характеристики компрессора с необходимой точностью.

Наша задача построить концепт модели, позволяющий определить целевые функции оптимизации, выбор методики расчётов или необходимость построения новых методик с учётом влияния различных факторов.

Методы исследования. Бустерная холодильная машина с диоксидом углерода в качестве рабочего вещества представляет собой двух каскадную систему с общим хладагентом, каждый из каскадов которой можно представить в виде самостоятельного контура. Принимая, что потеря эффективности бустера, главным образом, связана с несовершенством транскритического цикла 3-4-5-6a-6-7-3, показанного на рис. 1, следует его выделить и рассмотреть, как сложную техническую систему.

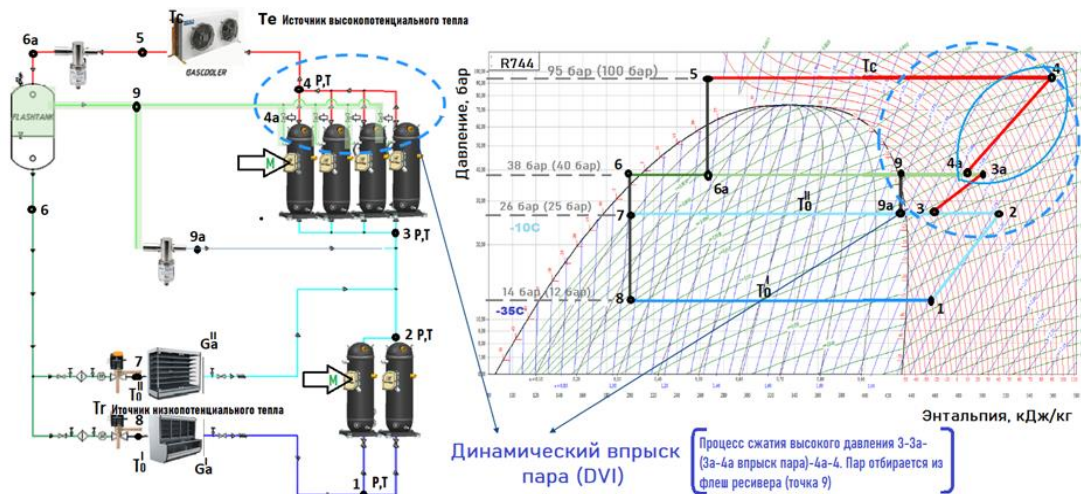


Рис. 1. Принципиальная схема и рабочая диаграмма бустерной ХМ на CO_2 с использованием СПК

Fig. 1. Schematic diagram and operating diagram of a CO_2 booster CM using SPC

Транскритический компрессор предназначен для повышения давления в процессе 3-4 (рис.1) со значений $P_3, (T_3)$ до значения $P_4, (T_4)$ массового потока хладагента G_a^{II} , при этом он имеет частоту вращения вала n , мощность на валу N_e , расходуемую на реализацию внутренних процессов и преодоление сил трения. О степени совершенства такого компрессора можно судить по объёмной производительности – V_d ($\text{м}^3/\text{ч}$), по объёмному КПД – η_v или по холодопроизводительности – Q_0 (кВт), условно пропорциональной общей хо-

лодопроизводительности бустерной системы. Характеристики бустерной ХМ, такие как холодопроизводительность, потребляемая мощность и холодильный коэффициент зависят от ряда параметров [20]. К таким параметрам можно отнести: конструктивные особенности системы, термодинамические характеристики рабочего тела и внешних сред, а также технологические, такие как массовые потоки холодильного агента и внешних сред; объемные и энергетические коэффициенты компрессора; коэффициенты теплопередачи и теплоотдачи рабочих сред в аппаратах, коэффициенты гидравлических сопротивлений и другие.

Таким образом, для учёта характеристик компрессора в оптимизации параметров бустерной ХМ и идентификации пути совершенствования технологии, следует сначала выделить их взаимосвязь, как показано на рис. 2, а затем рассмотреть компрессор как отдельную термодинамическую систему с определённым набором характеристик.



Рис. 2. Параметры взаимодействия ХМ с внешней средой и взаимосвязь с параметрами и характеристиками СПК

Fig. 2. Parameters of the interaction of CM with the external environment and relationship with the parameters and characteristics of the SEC

Как видно из представленной схемы, следует учитывать зависимость основных характеристик ХМ: потребляемой электрической мощности N_{ee} (kBm), холодильного коэффициента – ε , коэффициента обратимости – η_{rev} и Q_0 (kBm), не только от входных показателей, структуры, конструктивных параметров, но и от характеристик её элементов.

В частном случае задача формализуется как функция зависимости конструктивных параметров ХМ – S , массовых расходов – G (кг/ч) и температур – T (K) от параметров и характеристик компрессора:

$$\left. \begin{matrix} Q_0 \\ N_{ee} \\ \varepsilon \\ S^{sc} \end{matrix} \right\} = f(S, G, t), \quad (1)$$

где S^{sc} – в свою очередь, выражает совокупность конструктивных параметров и характеристик спирального компрессора.

Компрессор как многофакторный элемент сложной системы. Внешние параметры компрессора будут зависеть, от ряда факторов, в том числе, от схемы и характеристик элементов конструкции ХМ. Т.е. как показано на схеме рис. 2, компрессор следует рассматривать, как элемент сложной системы, необходимый для достижения единой цели путем решения совокупности задач при взаимодействии его с другими элементами и внешней средой. Изучение элементов сложных систем требует системного подхода, а значит должны быть рассмотрены все факторы и параметры системы, связанные с работой компрессора. Выражая физическую природу воздействия, фактор характеризует качественную сторону процесса, параметры количественную.

На рис. 3., показано: X – группа наблюдаемых, но нерегулируемых внешних факторов, воздействующих на объект (компрессор) – это температуры и давления всасывания, нагнетания $t_{вс}$, t_n , $P_{вс}$, P_n , массовый расход хладагента в цикле G_a (кг/ч), а M – характеристика электросети. Группа факторов E – ненаблюдаемые, а, следовательно, нерегулируемые, такие как характер и термодинамика процесса течения сплошной среды, микродеформации конструктивных элементов компрессора в процессе работы.

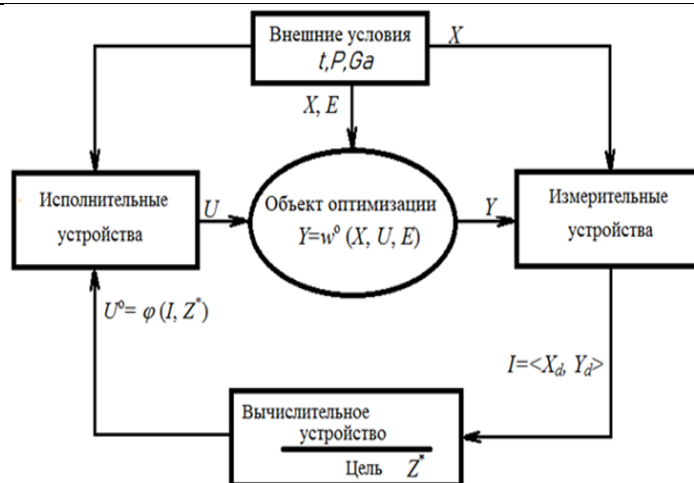


Рис. 3. Структура управления компрессором как элементом сложной технической системы

Fig. 3. Compressor control structure as an element of a complex technical system

Состояние объекта Y зависит от состояния его среды X : $Y = w_0(X)$, где w_0 – оператор. Цель Z^* представляет собой набор требований, предъявляемых субъектом к состоянию объекта. Проверить выполнение цели можно только по состоянию объекта Y , для чего преобразуем: $Z = \psi(Y)$. При $Z \neq Z^*$, $Y = w_0(X, M)$.

В основе процесса оптимизации лежит информация $I = \langle X_d, Y_d \rangle$, где $X_d = D_x(X)$, $Y_d = D_y(Y)$ – показания измерительных устройств, при этом часть входных факторов не наблюдаема, т. е. $Y = w_0(X, M, E)$. Таким образом, объект управления имеет три входа: наблюдаемый (X), управляющий (M), ненаблюдаемый (E). Для описания совокупности наблюдаемых, управляющих и выходных факторов обычно используется векторная форма записи $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, $M = (m_1, m_2, \dots, m_n)$ и так далее, с учетом которой математическое описание функционирования системы в общем виде можно представить следующим уравнением: $Y = \Phi(X, M, E)$. Обозначение рассматривается здесь как вектор-функция, поэтому

$$y_i = \varphi_i(X, M, E) \quad (2)$$

Каждое из уравнений (1), применительно к поставленной задаче, достаточно точно можно представить в виде

$$y_i = f_i(X, M) + \psi_i(E) \quad (3)$$

Задача математического описания заключается в необходимости установить вид функции f и оценить функцию ψ . В случае если бустерная ХМ работает в установившемся режиме, то общая описываемая система является детерминированной и стационарной, тогда как компрессор следует рассматривать как объект с распределёнными параметрами.

Наблюдаемые параметры в процессе сжатия 3-4 можно выразить как $X = f(G_a, P, T, V_{real}, N_e, \eta_v)$, а управляющие параметры как $M = (U, n)$. Следует отметить впрыск пара, отбираемого из ресивера точка 9, процесс 3а-4а, снижает температуру компримируемого рабочего тела, что приводит к увеличению Q_0 до 25%, а ε до 15% [21]. Данным процессом можно управлять посредством периодичности впрыска, а, следовательно, его можно отнести также к управляющим параметрам. В данном случае интенсификация процесса теплообмена как раз и даёт необходимый эффект расширения рабочего диапазона, что делает возможным применение СПК для транскритики.

Обращаясь к конструктивным особенностям спирального компрессора, который выражен параметром S^{sc} , можно отметить важность таких вопросов, как влияние силовых и тепловых деформаций на динамику рабочих процессов компрессора, силовые факторы в узлах трения. Высокие температуры и давления, присущие CO_2 , обращают внимание на вопрос устойчивого распределения масла, которое равнозначно решает задачи смазки, охлаждения трущихся пар и уплотнения зазоров в рабочей части СПК.

Концептуальная модель СПК в составе транскритического цикла. Таким образом, учитывая, конструктивные особенности компрессора и протекающие в нём термодинамические процессы, зависящие от свойств рабочих веществ, а их динамику от выбранного режима работы, пользуясь схематизацией параметров бустерной схемы, можно построить концептуальную модель влияния различных факторов на работу СПК, с целью определения целевых функций оптимизации компрессора для повышения эффективности транскритического цикла и бустерной системы в целом. Визуализировать данную концепцию можно в виде схемы, представленной на рис. 4.

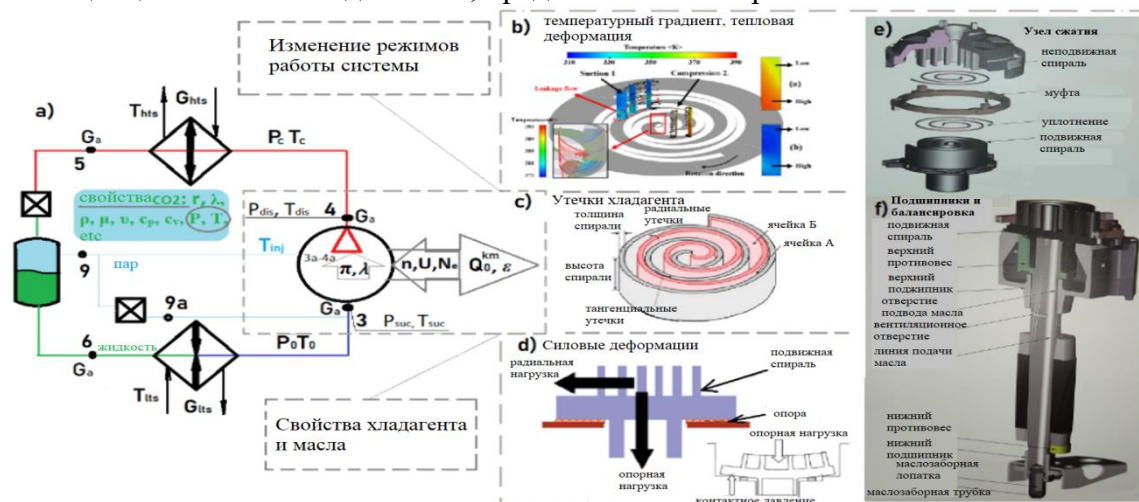


Рис. 4. Концептуальная модель взаимосвязей элементов транскритического цикла бустерной ХМ с СПК, выделенным в отдельную систему внутренних взаимосвязей
Fig. 4. Conceptual model of interrelationships between the elements of the transcritical cycle of a booster CM with the SPC separated into a separate system of internal interrelationships

Из представленной концепции очевидна взаимосвязь элементов системы и их связь с внешними характеристиками транскритической бустерной ХМ, при этом можно определить составляющие для идентификации оптимальных параметров СПК.

Основываясь на представленной концепции, можно принять за целевые функции повышения эффективности бустерной ХМ: снижение потребляемой мощности, где $N_{ee} \sim N_e$; повышение холодопроизводительности, где $Q_0 \sim Q_0^{scc} \sim V_{real}$, которые зависят от ряда факторов, таких как внешние характеристики, выраженные параметрами электросети, способами регулирования производительности компрессора, температурными нагрузками на ХМ и внутренними характеристиками, такими как G_a , P_c , P_0 , T_c , T_0 , и конструктивными особенностями компрессора, определяющими его характеристики. Апеллируя именно к конструктивным особенностям СПК, задача в рамках повышения эффективности ХМ сводится к оптимизации функции $\psi_i(E)$, под которой удобно рассматривать коэффициент подачи компрессора λ , как меру оценки его совершенства.

λ определяют обычно либо по расчетным зависимостям, либо аппроксимацией опытных данных для однотипных машин, получая зависимость $\lambda = f(\pi)$. Последний подход работает в случае, когда существует модельный ряд компрессоров, апробирован в широком диапазоне работы на конкретном типе хладагента и подвержен линейной аппроксимации. В случае процесса с нелинейной зависимостью требуется создание адекватной математической модели, основанной на точных методиках расчёта.

Коэффициент подачи СПК, главным образом, зависит от протечек рабочего вещества в проточной части компрессора [21], это основной вид объёмных потерь, спирального компрессора. Причём как отмечено в работах [11, 22] и показано на рис. 5 радиальные протечки преобладают над тангенциальными практически на порядок.

Обращаясь к методике расчёта протечек, следует понимать, что традиционные методы использованные, например, в работах [11, 12, 16, 18, 22], по разным оценкам имеют погрешность, достигающую 60%, с учетом допущений о стационарности стенок щели.

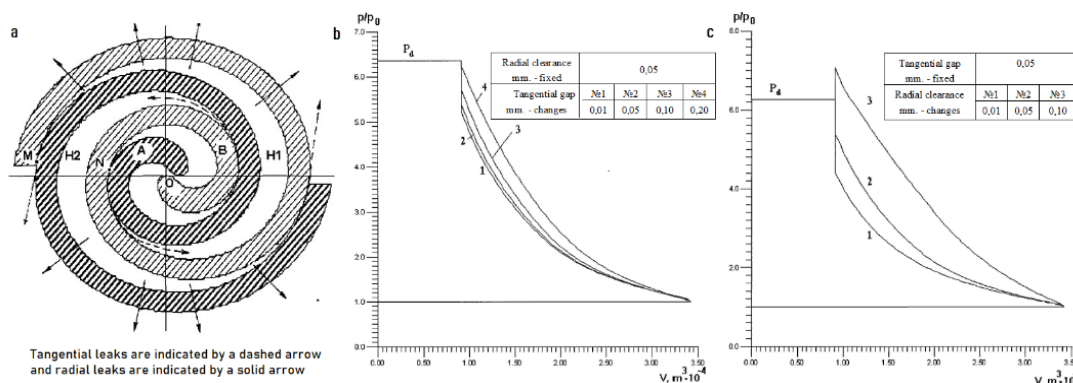


Рис. 5. (а) качественный характер утечек; (б) количественный характер тангенциальных утечек; (с) количественный характер радиальных утечек
Fig. 5. (a) the qualitative nature of the leaks; (b) quantitative nature of tangential leaks; (c) quantitative nature of radial leaks

При этом, в силу высоких давлений CO_2 в транскритическом цикле, есть все основания полагать, что динамика движения потока рабочего тела через зазор с подвижной стенкой будет иной. Таким образом, необходима альтернативная модель расчёта протечек в узких щелях, учитывающая подвижность их стенок.

Подобные методики разрабатывались для спиральных насосов, поршневого компрессора и описаны в работах [23-26], где показана необходимость учёта подвижности стенок щели в случаях высоких скоростей ротора, при молекулярном движении рабочего тела в насосах. В работах [27, 28] учёт подвижности щели учтён в разработанной методике относительно расчёта протечек в винтовых компрессорах. Данный метод был успешно апробирован с минимальной погрешностью, что даёт основание полагать о рациональности адаптации данной методики к расчётам в спиральных компрессорах.

Из концепции рис. 4, видно, что внешние факторы компрессора зависят от параметров ХМ. Так степень повышения давления π компрессора, зависит от давлений кипения и конденсации и ряда других параметров. Изменение тепловой нагрузки на холодильную машину, влечёт изменение массового расхода хладагента G_a , который зависит от частоты вращения вала компрессора n . Оба фактора оказывают прямое влияние на характер протечек и зависят от выбранного режима работы ХМ.

Рассматривая протечки в компрессоре как следствие выбора конструктивного зазора и его зависимость от тепловых и силовых деформаций рабочих органов, следует добавить в модель соответствующие методики расчёта [29]. В работе указывается, что тепловые деформации преобладают над силовыми для СПК сухого сжатия, но для холодильного компрессора с учётом высоких давлений данный факт должен быть проверен.

Впрыск пара, учтённый у концепции рис.4 как процесс 3а-4а и показанный на рис.2. несёт важную роль для транскритического компрессора, не только увеличивая производительность, но и предоставляя возможность её регулировать за счёт периодичности инъекции. Условно можно принять, что впрыск пара не меняет фазового состояния компримируемой среды, но меняет её массу, увеличивая работу на сжатие. Наличие масляной фракции в составе рабочего вещества, меняет качественный и количественный характер протечки, и этот факт следует учитывать обязательно.

Обсуждение результатов. Всесторонний учёт определяющих факторов и режимов работы оборудования даёт возможность получить инструмент расчёта характеристик компрессора с наименьшей погрешностью. А значит, верифицировав полученные данные, можно найти оптимальные точки совместной работы элементов системы с заданными внешними параметрами, как показано на рис. 6. Построение внешней характеристики ХМ, позволяет спрогнозировать положение рабочей точки при изменении режимов работы компрессора. Используя какой – либо универсальный инструмент нелинейной аппроксимации, как например, искусственную нейронную сеть (ИНС), имея многомерный массив

данных, можно в итоге получить адекватные обобщённые характеристики компрессора. Причём в случае ИНС возможно обучение и адаптация к изменению условий по средствам применения прикладных пакетов программ.

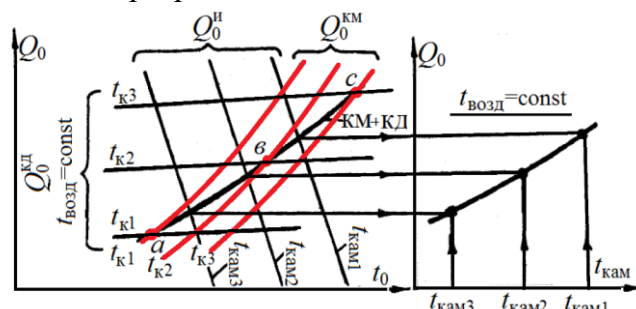


Рис. 6. Графические характеристики холодильной машины

Fig. 6. Characteristics of the chiller

На основании данных источника [4], можно утверждать, что спиральная технология в транскритическом цикле бустерных холодильных машин на CO_2 , оправдывает себя за счёт улучшения экономических показателей, снижая капитальные и эксплуатационные затраты. Причём, наличие инструмента оптимизации характеристик СПК представляет внутренний потенциал бустерной ХМ, что в конечном итоге приводит к увеличению её энергоэффективности. Для формализации и решения задачи оптимизации следует использовать структурный подход, основанный на концептуальной модели (рис.4). Учитывая современное состояние развития спиральной технологии, в исследовательских работах основное внимание следует уделить разработке новых методик расчёта протечек компримируемой среды, как основного фактора объёмных и энергетических потерь СПК.

Вывод.

1. Системный подход к повышению эффективности бустерной ХМ, предполагает её поэтапное рассмотрение с целью анализа процессов. Это дает возможность идентифицировать взаимосвязи элементов рассматриваемого каскада (транскритического цикла), выделить компрессор, как отдельное звено, имеющее определённую степень влияния на общие характеристики каскада.

2. Концептуальная модель использования СПК в бустерной ХМ, позволяет выявить степень несовершенства, влияющую на характеристики компрессора, и соответственно внешние характеристики ХМ.

3. Выбранный структурный подход к решению вопроса оптимизации характеристик СПК, позволит формализовать поставленную задачу, определив рациональный путь достижения цели, по средствам построения наиболее адекватной ММ, при этом:

- выделив наблюдаемые и ненаблюдаемые, регулирующие параметры;
- рассмотрев определяющие факторы, влияющие на эффективность компрессора в составе системы;
- выбрать или разработать необходимые методики расчёта, наиболее удовлетворяющие характерным процессам в СПК с учётом свойств используемого хладагента;
- выбрать необходимые и достаточные методы верификации расчётных данных.

4. Разработка новой методики расчёта протечек компримируемой среды с учётом подвижности стенок предполагает также внимание к деформациям спиралей в процессе работы, что повысит качество построения характеристик компрессора.

Библиографический список:

1. Refrigeration portal. S. Y. Pleshanov. Prospects of Development of Carbon Dioxide (CO_2) Refrigeration Systems in Russia. [Electronic resource]. 2020. Date of accession: 10.02.2022. URL:<http://refportal.com/news/market-news/perspektivi-razvitiya-holodil-nih-sistem-na-diokside-ugleroda-so2-v-rossii/>.
2. World Guide to Transcritical CO_2 Refrigeration. [Electronic resource]. 2020. Date of access: 16.01.2022. URL:<https://issuu.com/shecco/docs/r744-guide>.

3. Pronin V. A., Kovanov A. V., Kalashnikova E. A., Tsvetkov V. A. Perspective of Ozone-Safe Refrigerants with Low Global Warming Potential in Scroll Compressors. Part 1 // UMSTU Bulletin of series "Aviation and rocket and power engineering". 2021. T. 5, № 4. С. 9-16.
4. Emerson aims to increase R744 adoption in smaller shops by simplifying systems. [Electronic resource]. 2021. Access date: 26.01.2022. URL: <https://r744.com/emerson-aims-to-increase-r744-adoption-in-small-stores-by-simplifying-systems-dynamic-vapor-injection/>
5. Evangelos B., Christos T. Incorporation of an organic Rankine cycle in a transcritical booster CO2 refrigeration system // International Journal of Energy Research. 2020. Vol. 44, no.10, P. 7974-7988.
6. Zhu Y., Li C., Zhang F., Jiang P. Comprehensive experimental study on a transcritical CO2 ejector-expansion refrigeration system // Energy Convers. Manag. 2017. Vol. 151, P. 98-106.
7. Taslimitaleghani S., Sorin M., Poncet S. Energy and exergy efficiencies of different configurations of the ejector-based CO2 refrigeration systems // J. Energy Prod. Manag. 2018. Vol. 3, no.1, P. 22–33.
8. Sevilla D., Cuisano J., Ortega P. Advanced exergetic analysis for design optimization of a CO2 refrigeration system using parallel compression // IEEE ANDESCON. 2020. pp. 1-6.
9. Zheng S, Wei M, Hu C, Song P, Tian R. Flow characteristics of tangential leakage in a scroll compressor for automobile heat pump with CO2 // Sci. China Technol. Sci. 2021. Vol. 64, no. 5, P. 971-983.
10. Sun S., Wang X., Guo P., Wu K., Luo X., Liu G. Numerical analysis of the transient leakage flow in axial clearance of a scroll refrigeration compressor // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering. 2019. Vol. 236, no.1, P. 47-61.
11. Pereira E., Deschamps C. Numerical analysis and correlations for radial and tangential leakage of gas in scroll compressors // Int J Refrigeration. 2020. Vol. 110, P. 239–247.
12. Kenji Y., Hideto N., Mihoko S. Development of Large Capacity CO2 Scroll Compressor // International Compressor Engineering Conference. 2008. Paper 1836.
13. Minikaev A., Yerezhep D., Zhignovskaia D., Pronin V., Kovanov A. Power interactions of scroll compressor elements // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020. no. 826, P. 012022
14. Zheng S., Wei M., Song P., Hu C., Tian R., Thermodynamics and flow unsteadiness analysis of transcritical CO2 in a scroll compressor for mobile heat pump air-conditioning system // Applied Thermal Engineering. 2020, Vol. 175. P.115368.
15. Hidaka A, Ikeda A, Morimoto T, Koura O, Matsui M. Axial and Radial Force Control for a CO2 Scroll Expander // HVAC&R Research. 2009, Vol. 15, no. 4. P. 759-770.
16. Hirofumi Y., Atsushi S., Yoshiyuki F., Takashi M., Noriaki I. Clearance Control of Scroll Compressor for CO2 Refrigerant. // International Compressor Engineering Conference. 2008, Paper 1848.
17. Blunier G., Cirrincione Y., Hervé A., Miraoui A. New analytical and dynamical model of a scroll compressor with experimental validation // International Journal of Refrigeration. 2008. Vol. 32., no.5, P. 874-891.
18. Chen Y., Halm N. P., Groll E. A., Braun J. E. Mathematical Modeling of Scroll Compressors-Part I: Compression Process Modeling // International Journal of Refrigeration. 2002, Vol. 25, no. 6, P. 731-750.
19. Chen Y., Halm N. P., Groll E. A., Braun J. E. Mathematical Modeling of Scroll Compressors-Part II: Overall Scroll Compressor Modeling // International Journal of Refrigeration. 2002. vol. 25, no. 6 pp. 751-764.
20. Татаренко Ю.В. Введение в математическое моделирование характеристик паровых компрессорных холодильных машин - Санкт-Петербург: СПб.: Университет ИТМО; ИХиБТ, 2015. - 100 с.
21. Щерба В. Е. Теория, расчет и конструирование поршневых компрессоров объемного действия: учебное пособие для вузов / В. Е. Щерба. — 2-е изд., доп. — Москва: Издательство Юрайт, 2022. — 323 с. — (Высшее образование). — ISBN 978-5-534-09232-5
22. Косачевский В. А. Разработка метода расчета и анализ рабочего процесса спиральных компрессоров: дис. ... кандидата технических наук: 05.04.06 / Санкт-Петербургский гос. техн. ун-т. - Санкт-Петербург. 1998, - 188 с.
23. Райков А.А., Бронштейн М.Д., Бурмистров А.В., Саликеев С.И. Влияние скорости орбитального движения спирали на перетекания в спиральном вакуумном насосе // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия машиностроение. 2014, Т.4, № 97, с.73-82.
24. Бурмистров А.В., Бронштейн М.Д., Райков А.А., Саликеев С.И., Якупов Р.Р. Расчет проводимости профильного канала спирального вакуумного насоса при молекулярном режиме течения газа // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2013, № 9-10, с.3-10.
25. Бурмистров А.В., Бронштейн М.Д., Гимальтинов А.Т., Райков А.А., Саликеев С.И. Численное моделирование потоков газа в щелевых каналах с движущимися стенками при давлениях ниже атмосферного // Вестник Казанского технологического университета. 2016. Т. 19, №5, с. 116-120.
26. Пронин В.А., Цветков В.А., Молодова Ю.И., Жигновская Д.В. Влияние подвижности стенки щели на течение газа в радиальном зазоре "поршневое кольцо – зеркало цилиндра" компрессора // Вестник Международной академии холода. 2020. № 2. С.19-25
27. Пронин В. А. Винтовые однороторные компрессоры для холодильной техники и пневматики: диссертация ... доктора технических наук: 05.04.03. – Санкт-Петербург, 1998. 226 с.

28. Pronin V., Kuznetsov Y., Zhignovskaia D., Minikaev A., Yerezhep D. Improving methodology calculating the leakages compressible environment in the working part of a screw compressor // AIP Conference Proceedings. 2019. Vol. 2141, P. 030010.
29. Паранин Ю. А. Разработка и исследование спирального компрессора сухого сжатия: диссертация ... кандидата технических наук : 05.04.06 / - Казань, 2011. - 254 с.

References:

1. Refrigeration portal. С. Ю. Плешанов. Перспективы развития холодильных систем на диоксиде углерода (CO₂) в России. [Электронный ресурс]. 2020. Дата обращения: 10.02.2022. URL:<http://refportal.com/news/market-news/perspektivi-razvitiya-holodil-nih-sistem-na-diokside-ugleroda-so2-v-rossii/>
2. World Guide to Transcritical CO₂ Refrigeration. [Электронный ресурс]. 2020. Дата обращения: 16.01.2022. URL;<https://issuu.com/shecco/docs/r744-guide>
3. Pronin V, Kovanov A, Kalashnikova E, Tsvetkov V (2021) The prospect of using ozone-safe refrigerants with low global warming potential in scroll compressors. Part 1. *Omsk Scientific Bulletin. Aviation-rocket and Power Engineering series*. 2021; 5(4):9-16. doi: 10.25206/2588-0373-2021-5-4-9-16. [In Russ]
4. Emerson Aims to Increase R744 Adoption in Small Stores by Simplifying Systems (2021) <https://r744.com/emerson-aims-to-increase-r744-adoption-in-small-stores-by-simplifying-systems-dynamic-vapor-injection/> Accessed 26 Jan. 2022
5. Evangelos B., Christos T. Incorporation of an organic Rankine cycle in a transcritical booster CO₂ refrigeration system. *International Journal of Energy Research*. 2020; 44(10):7974-7988.
6. Zhu Y., Li C., Zhang F., Jiang P. Comprehensive experimental study on a transcritical CO₂ ejector-expansion refrigeration system. *Energy Convers. Manag.* 2017; 151: 98-106.
7. Taslimitaleghani S., Sorin M., Poncet S. Energy and exergy efficiencies of different configurations of the ejector-based CO₂ refrigeration systems. *J. Energy Prod. Manag.* 2018; 3(1): 22–33.
8. Sevilla D., Cuisano J., Ortega P. Advanced exergetic analysis for design optimization of a CO₂ refrigeration system using parallel compression. *IEEE ANDESCON*. 2020; 1-6.
9. Zheng S, Wei M, Hu C, Song P, Tian R. Flow characteristics of tangential leakage in a scroll compressor for automobile heat pump with CO₂. *Sci. China Technol. Sci.* 2021; 64(5): 971-983.
10. Sun S., Wang X., Guo P., Wu K., Luo X., Liu G. Numerical analysis of the transient leakage flow in axial clearance of a scroll refrigeration compressor. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*. 2019; 236(1):47-61.
11. Pereira E., Deschamps C. Numerical analysis and correlations for radial and tangential leakage of gas in scroll compressors. *Int J Refrigeration*. 2020; 110: 239–247.
12. Kenji Y., Hideto N., Mihoko S. Development of Large Capacity CO₂ Scroll Compressor // *International Compressor Engineering Conference*. 2008. Paper 1836.
13. Minikaev A., Yerezhep D., Zhignovskaia D., Pronin V., Kovanov A. Power interactions of scroll compressor elements. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 826.:012022
14. Zheng S., Wei M., Song P., Hu C., Tian R., Thermodynamics and flow unsteadiness analysis of transcritical CO₂ in a scroll compressor for mobile heat pump air-conditioning system. *Applied Thermal Engineering*. 2020; 175:115368.
15. Hidaka A, Ikeda A, Morimoto T, Koura O, Matsui M. Axial and Radial Force Control for a CO₂ Scroll Expander. *HVAC&R Research*. 2009; 15(4):759-770.
16. Hirofumi Y., Atsushi S., Yoshiyuki F., Takashi M., Noriaki I. Clearance Control of Scroll Compressor for CO₂ Refrigerant. *International Compressor Engineering Conference*. 2008;1848.
17. Blunier G., Cirrincione Y., Hervé A., Miraoui A. New analytical and dynamical model of a scroll compressor with experimental validation. *International Journal of Refrigeration*. 2008; 32(5): 874-891.
18. Chen Y., Halm N. P., Groll E. A., Braun J. E. Mathematical Modeling of Scroll Compressors-Part I: Compression Process Modeling. *International Journal of Refrigeration*. 2002; 25(6): 731-750.
19. Chen Y., Halm N. P., Groll E. A., Braun J. E. Mathematical Modeling of Scroll Compressors-Part II: Overall Scroll Compressor Modeling. *International Journal of Refrigeration*. 2002;25(6):751-764.
20. Tatarenko U.V. Introduction to mathematical modelling of steam compressor refrigeration machine characteristics - St. Petersburg: St. Petersburg: ITMO University; IH&BT, 2015: 100.
21. Shcherba V.E. Theory, calculation and design of displacement piston compressors: textbook for universities / V.E. Shcherba. - 2-th edition. ext. - Moscow: Publishing House smart, 2022: 323 - (Higher education). - ISBN 978-5-534-09232-5 [In Russ]
22. Kosachevsky V. A. Development of calculation method and analysis of the spiral compressors working process: Cand. D. in Technical Sciences: 05.04.06 / Saint-Petersburg state technical university. - St.-Petersburg. 1998: 188. [In Russ]
23. Raikov, A.A.; Bronstein, M.D.; Burmistrov, A.V.; Salikeev, S.I. Influence of the orbital speed of a spiral on the overflow in a spiral vacuum pump (in Russian). *Vestnik of Moscow State Technical University named after N.E. Bauman. Mechanical Engineering Series*. 2014; 4(97):73-82. [In Russ]

24. Burmistrov A.V., Bronstein M.D., Raikov A.A., Salikeev S.I., Yakupov R.R. Calculation of conductivity of a spiral vacuum pump profile channel under the molecular mode of gas flow. *Izvestia vysshee universitet. Problems of Power Engineering*. 2013;9-10:3-10. [In Russ]
25. Burmistrov A.V., Bronstein M.D., Himaltynov A.T., Raikov A.A., Salikeev S.I. Numerical simulation of gas flows in slot channels with moving walls at pressures below atmospheric pressure. *Bulletin of Kazan Technological University*. 2016; 19(5): 116-120. [In Russ]
26. Pronin V.A., Tsvetkov V.A., Molodova Yu.I., Zhignovskaya D.V. Effect of slit wall mobility on gas flow in the radial gap "piston ring - cylinder mirror" compressor. *Bulletin of the International Academy of Refrigeration*. 2020;2:19-25[In Russ]
27. Pronin V. A. Screw single-rotor compressors for refrigeration and pneumatics: dissertation ... Doctor of Technical Sciences: 05.04.03. - Saint Petersburg, 1998: 226. [In Russ]
28. Pronin V., Kuznetsov Y., Zhignovskaia D., Minikayev A., Yerezhep D. Improving methodology calculating the leakages compressible environment in the working part of a screw compressor. *AIP Conference Proceedings*. 2019; 2141: 030010.
29. Paragin Y. A. Development and research of scroll compressor of dry compression: dissertation ...D. thesis: 05.04.06 / - Kazan, 2011. - 254 p. [In Russ]

Сведения об авторах:

Пронин Владимир Александрович, доктор технических наук, профессор, ординарный профессор образовательного центра «Энергоэффективные инженерные системы»; vapronin@itmo.ru

Кованов Александр Викторович, аспирант образовательного центра «Энергоэффективные инженерные системы»; Kovanov76@yandex.ru

Цветков Вадим Александрович, аспирант, ассистент образовательного центра «Энергоэффективные инженерные системы»; wadimtsvetkov@mail.ru

Михайлова Екатерина Николаевна, аспирант образовательного центра «Энергоэффективные инженерные системы»; mikhaylova_en@mail.ru

Белов Павел Андреевич, магистрант образовательного центра «Энергоэффективные инженерные системы»; mr.beloff99@gmail.com

Information about authors:

Vladimir A. Pronin, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Ordinary Prof., Educational Center "Energy Efficient Engineering Systems"; vapronin@itmo.ru

Alexander V. Kovanov, Postgraduate Student, Educational Center "Energy Efficient Engineering Systems"; Kovanov76@yandex.ru

Vadim A. Tsvetkov, postgraduate student, assistant of the educational center "Energy Efficient Engineering Systems"; wadimtsvetkov@mail.ru

Ekaterina N.Mikhailova, Postgraduate Student, Educational Center "Energy Efficient Engineering Systems"; mikhaylova_en@mail.ru

Pavel A.Belov, master student of the educational center "Energy Efficient Engineering Systems"; mr.beloff99@gmail.com

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 26.12.2022.

Одобрена после рецензирования/ Revised 20.01.2023.

Принята в печать/Accepted for publication 20.01.2023.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 004.056

DOI: 10.21822/2073-6185-2023-50-1-53 -61

Оригинальная статья/Original Paper

**Применение методов машинного обучения для автоматизированного
обнаружения сетевых вторжений**

М.В. Бабичева, И.А. Третьяков

Донецкий национальный университет,
283001, г. Донецк, ул. Университетская, 24, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является развитие автоматизированных систем обнаружения сетевых атак, способных адаптироваться под постоянно меняющийся характер сетевых атак и новые виды угроз. В основе таких систем должны быть использованы алгоритмы и модели машинного обучения, которые способны выявлять сложные зависимости между данными в процессе обучения. **Метод.** Для обучения моделей была подготовлена выборка с признаками нормального и аномального трафика, причем она была прорежена и сбалансирована в результате предварительного статистического анализа. Отобраны пять алгоритмов машинного обучения и протестированы, как на обучающем множестве признаков, так и на реальном тестовом множестве, полученном экспериментально. По результатам экспериментов отобран классификатор случайного леса, показавший наилучшие результаты. **Результат.** Разработана модель для обнаружения сетевых вторжений, которая показала точность обнаружения на реальном трафике 0,99. **Вывод.** Показано, что система обнаружения сетевых вторжений на основе машинного обучения может решить проблему гибкой защиты, которая могла бы адаптироваться под постоянно меняющийся характер сетевых атак, поскольку одним из самых важных преимуществ машинного обучения в выявлении сетевых вторжений является способность обучаться признакам атак и выявлять случаи, которые не характерны для тех, что наблюдались ранее.

Ключевые слова: информационная безопасность, сетевые атаки, сетевой трафик, машинное обучение, модель обнаружения вторжений, автоматизированные системы.

Для цитирования: М.В. Бабичева, И.А. Третьяков. Применение методов машинного обучения для автоматизированного обнаружения сетевых вторжений. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023; 50(1):53-61. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-1-53-61

Application of machine learning methods for automated detection of network intrusions

M.V. Babicheva, I.A. Tretyakov

Donetsk National University,
24 Universitetskaya Str., Donetsk 283001, Russia

Abstract. Objective. Development of automated network attack detection systems capable of adapting to the ever-changing nature of network attacks and new types of threats. Such systems should be based on machine learning algorithms and models that are able to identify complex dependencies between data in the learning process. **Method.** To train the models, a sample with signs of normal and abnormal traffic was prepared, and it was thinned and balanced as a result of preliminary statistical analysis. Five machine learning algorithms were selected and tested, both on a training set of features and on a real test set obtained experimentally. Based on the results of the experiments, a random forest classifier was selected, which showed the best results. **Result.** A model for detecting network intrusions has been developed, which showed a detection accuracy of 0.99 on real traffic. **Conclusion.** It is shown that a machine learning-based network intrusion detection system can solve the problem of flexible protection that could adapt to the ever-changing nature of network attacks, since one of the most im-

portant advantages of machine learning in detecting network intrusions is the ability to learn the signs of attacks and identify cases that are uncharacteristic of those that were observed earlier.

Keywords: information security, network attacks, network traffic, machine learning, intrusion detection model, automated systems

For citation: M.V. Babicheva, I.A. Tretyakov. Application of machine learning methods for automated detection of network intrusions. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science. 2023; 50 (1): 53-61. DOI: 10.21822 /2073-6185-2023-50-1-53-61

Введение. В современном мире в связи с быстрыми темпами развития информационных технологий стремительно увеличивается объем сетевого трафика, что приводит к постоянному увеличению угроз сетевой безопасности, увеличению количества нарушений информационной безопасности и созданию новых типов атак. Однако в свою очередь появляются новые и более эффективные методы защиты от сетевых атак [1-6].

Таким образом, процесс выявления сетевых вторжений является актуальной научно-технической задачей и ориентирован на противодействие угрозам сетевой безопасности и предотвращение нарушений информационной безопасности. Противодействие актуальным угрозам сетевой безопасности в настоящее время невозможно без развития автоматизированных систем обнаружения атак, способных адаптироваться под постоянно меняющийся характер сетевых атак и новые виды угроз. Следовательно, в основе таких систем должны быть использованы алгоритмы и модели машинного обучения, способные выявлять сложные зависимости между данными в процессе обучения, и являющиеся перспективным инструментом для решения задач защиты информации [7-12].

Постановка задачи. Учитывая вышесказанное, для построения модели автоматизированной системы обнаружения сетевых вторжений на основе машинного обучения, необходимо:

- выбрать наиболее подходящий набор данных для обучения системы обнаружения сетевых вторжений и подходящую для решения поставленной задачи модель;
- подготовить наборы данных для обучения и провести предварительную обработку данных, сформировав признаковое пространство;
- проверить работоспособность настроенной и обученной модели на реальных данных, проанализировать полученные результаты.

Методы исследования. Выбор набора данных и формирование признакового пространства. Для обучения модели обнаружения сетевых атак был использован один из наиболее актуальных наборов данных CIC-IDS2017 [13]. В табл. 1 представлен фрагмент данного набора.

Таблица 1. Фрагмент набора данных для обучения CIC-IDS2017
Table 1. A fragment of the training dataset CIC-IDS2017

№	Название файла File name	Атаки Attacks	Количество записей Number of records
1	Monday-WorkingHours.pcap_ISCX.csv	Benign (обычный трафик)	529918
2	Tuesday-WorkingHours.pcap_ISCX.csv	Benign, FTP-Patator, SSH-Patator	445909
3	Wednesday-workingHours.pcap_ISCX.csv	Benign, DoS GoldenEye, DoS Hulk, DoS Slowhttptest, DoS slowloris, Heartbleed	692703
4	Thursday-WorkingHours-Morning-WebAttacks.pcap_ISCX.csv	Benign, Web Attack – Brute Force, Web Attack – Sql Injection, Web Attack – XSS	170163
5	Thursday-WorkingHours-Afternoon-Infiltration.pcap_ISCX.csv	Benign, Infiltration	288602

Этот набор данных содержит как реальный фоновый трафик (нормальный трафик), так и трафик, содержащий разнообразные атаки. Он удобен тем, что включает в себя пре-обработанные файлы в формате CSV, содержащие размеченные сессии с выделенными признаками в разные дни наблюдения.

В рамках данной работы была выбрана только одна обучающая выборка с классом сетевых атак – веб-атаки (Thursday-WorkingHours-Morning-WebAttacks.pcap_ISCX.csv). Каждая запись в нем представляет собой сетевую сессию и характеризуется 84 признаками. На рис. 1 представлены основные признаки наличия атаки.

```
[ ] 1 model['Label'].value_counts()

BENIGN                393427
PortScan              158944
DDoS                  128027
Web Attack - Brute Force    1507
Web Attack - XSS           652
Web Attack - Sql Injection   21
Name: Label, dtype: int64
```

Рис. 1. Выбранные классы атак

Fig. 1. Selected attack classes

На рис. 1 присутствуют такие атаки, как «Сканирование портов», DDOS, «Брутфорс», XSS и SQL-инъекции. Причем, для каждой атаки представлено различное количество признаков. Выборка была проанализирована и обработана: исключены повторяющиеся признаки (например, «Fwd Header Length»), удалены записи с null значениями идентификатора сессии «Flow ID», нечисловые значения признаков, неопределенные значения и бесконечные значения значениями заменены на -1, строковые значения приведены к числовым, закодированы ответы в обучающей выборке (0 – нет атаки, 1 – есть атака), на выходе модели. Однако такая обработка привела к несбалансированности выборки. А такой дисбаланс может в дальнейшем усложнить обучение модели. На рис. 2 показано расхождение между обучающими и тестовыми данными в несбалансированной выборке.

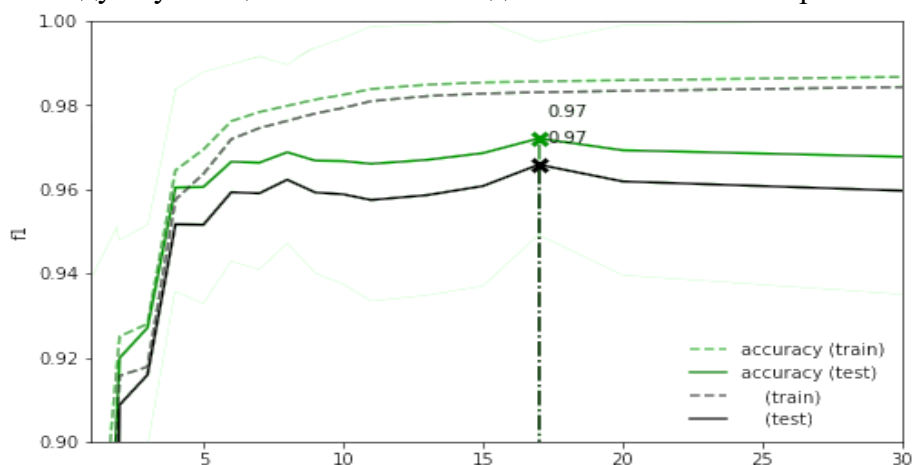


Рис. 2. Расхождение между обучающими и тестовыми данными в несбалансированной выборке

Fig. 2. Discrepancy between training and test data in an unbalanced sample

Из рис. 2 видно, что ассурасу для обучающих данных гораздо выше, чем для тестовой. Дисбаланс был устранен методом случайного сэмплирования, а именно субдискретизацией. В результате эмпирически были выбраны коэффициенты 70% и 30% (наличие и отсутствие атаки). Кроме того, были исключены такие признаки, как «Flow ID», «Source IP», «Source Port», «Destination Port», «Protocol», «Timestamp», так как для обнаружения атаки они не важны. После субдискретизации выборка стала намного более сбалансиро-

ванной, и расхождение между обучающими и тестовыми данными устранено, что показано на рис. 3.

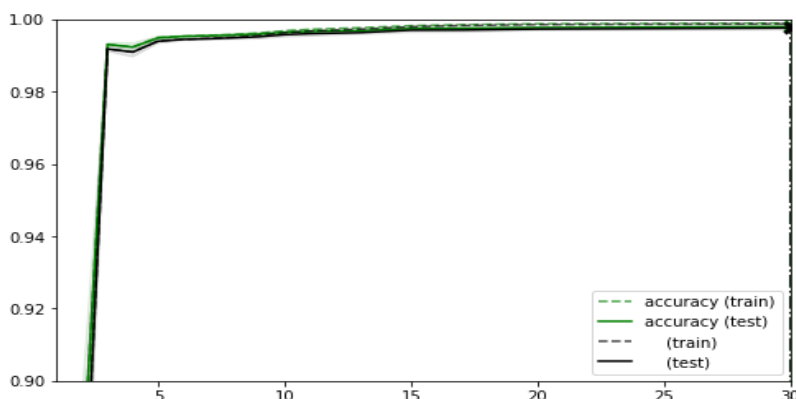


Рис. 3. Расхождение между обучающими и тестовыми данными в сбалансированной выборке

Fig. 3. Discrepancy between training and test data in a balanced sample

Для анализа наиболее значимых признаков использовался классификатор случайного леса Random Forest Classifier [14]. В процессе исследования и настройки модели было выбрано оптимальное количество деревьев 250, увеличение количества деревьев приводило к переобучению. Последующий анализ выделенных признаков показал, что некоторые признаки не имеют практической значимости, и их количество сократилось до 20. На рис. 4 представлены отобранные признаки в порядке убывания значимости.



Рис. 4. Наиболее значимые признаки, отобранные классификатором с последующей корректировкой

Fig. 4. The most significant features selected by the classifier with subsequent adjustment

Для сокращения признакового пространства были рассчитаны коэффициенты корреляции Пирсона, которые позволили определить наличие зависимости между парами признаков и удалить 1 признак из пары. Согласно результатам корреляционного анализа, из пространства признаков были исключены следующие признаки: Avg Fwd Segment Size, Subflow Fwd Bytes, Avg Bwd Segment Size, PSH Flag Count, Subflow Bwd Bytes, ACK Flag Count, Packet Length Std, Packet Length Mean. В итоге осталось 10 наиболее значимых признаков. Матрицы корреляции до и после удаления признаков, с обнаруженной зависимостью представлена на рис. 5.

Проверка работоспособности модели на реальных данных. Для проверки корректности работы модели на реальном сетевом трафике был использован сетевой анализатор Wireshark и сниффер (язык программирования C#, среда разработки Microsoft Visual Studio), который может выделять признаки TCP сессии и сразу формировать набор данных, который далее используется в модели. По итогу работы сниффера формируются три папки dataset, pcap, session. В папке dataset находятся выделенные признаки сессии (то есть необходимый набор данных для модели).

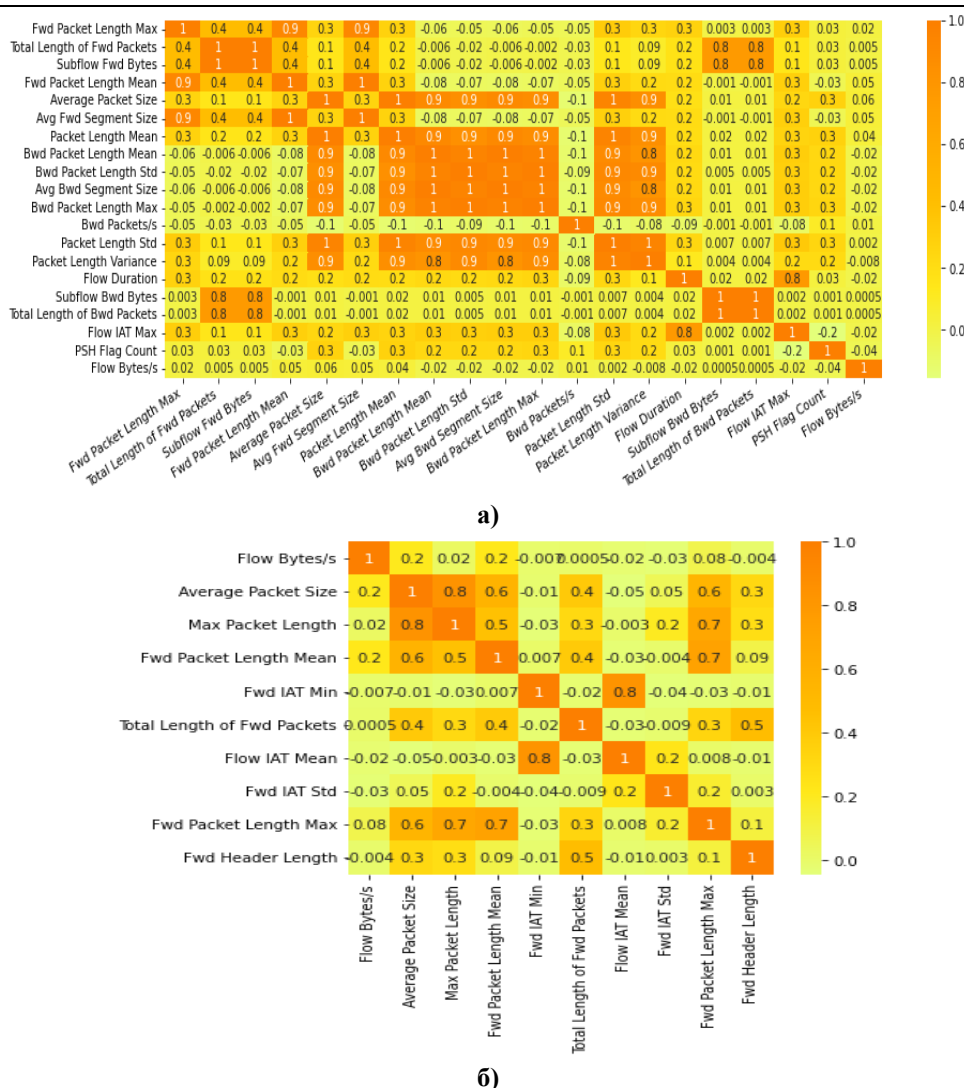


Рис. 5. Корреляционные матрицы коэффициентов Пирсона до (а) и после (б) удаления признаков с наибольшими коэффициентами
Fig. 5. Correlation matrices of Pearson coefficients before (a) and after (b) removal of features with the highest coefficients

В папке pcap находятся файлы с трафиками из Wireshark, а в папке sessions соответственно отдельные сессии. Сниффер можно запустить вместо Wireshark и сразу же выделять из сетевого трафика сессии и признаки TCP сессии.

В качестве атакуемого устройства был использован компьютер Intel Pentium ® CPU G630, 2,70 GHz, на котором был запущен сетевой анализатор Wireshark. В этом же момент с другого такого же устройства проводились атаки. Проверка корректности работы модели проводилась в пять этапов:

1. Проверка распознавания сканирования портов. Для осуществления проверки распознавания сканирования портов на другом устройстве использовалось приложение для сканирования портов Port Scanner. После файл сетевого трафика направлялся на сниффер для выделения признаков TCP сессии, а затем в созданную модель обнаружения сетевых вторжений.
2. Проверка распознавания DDoS атаки. Для проведения DDoS атаки использовалось приложение Termux, в котором был загружен скрипт, написанный на Python, способный осуществить DDoS атаку. DDoS атаки проводились с разной протяженностью по времени. На рис. 6 можно увидеть работу данного приложения.

```

21:17 >_ ↑ ↓
sh: figlet: inaccessible or not found

Author : HA-MRX
You Tube : https://www.youtube.com/c/HA-MRX
github : https://github.com/Ha3MrX
Facebook : https://www.facebook.com/muhamad.jabar222

IP Target : 192.168.88.32
    
```

Рис. 6. Работа приложения Termux

Fig. 6. Operation of the Termux application

3. Проверка распознавания нескольких атак одновременно. Чтобы проверить распознавание нескольких разных атак на компьютер, программы, использовавшиеся ранее, запускались с другого устройства одна за другой.
4. Проверка распознавания веб-атак (Brute Force, Sql-инъекция, XSS). Для проверки распознавания веб-атак из открытых источников был взят файл с сетевым трафиком, который содержит такие атаки, как Brute Force, Sql-инъекция, XSS. Основываясь на исследованиях, уже проведенных другими авторами, можно сказать, что именно веб-атаки являются одними из наиболее сложных для распознавания системами обнаружения атак на основе нейронных сетей. С помощью сниффера из этого файла были выделены признаки TCP сессии, и полученный набор данных был использован в созданной модели обнаружения. С помощью сниффера из этого файла были выделены признаки TCP сессии, и полученный набор данных был использован в созданной модели обнаружения. Количественный состав файла с веб-атаками и результат работы модели представлены на рис. 7.

а)

```

Общее время работы: 0.0095977783203125 seconds
{'BENIGN': 5282,
 'PortScan': 4,
 'Web Attack - Brute Force': 1322,
 'Web Attack - Sql Injection': 11,
 'Web Attack - XSS': 648}

BENIGN                5087
Web Attack - Brute Force 1507
Web Attack - XSS        652
Web Attack - Sql Injection 21
Name: Label, dtype: int64
    
```

б)

Рис. 7. Количественный состав файла с веб-атаками (а) и результат работы модели (б)

Fig. 7. The quantitative composition of the file with web attacks (a) and the result of the model (b)

5. Проверка распознавания сетевого трафика без атак для обнаружения ложных срабатываний. Поскольку созданная модель обнаружения сетевых вторжений не является идеально верной, необходимо проверить будут ли ложные срабатывания в сетевом трафике без наличия атак. Для осуществления проверки был взят нормальный сетевой трафик за определенное количество времени. По результатам проверок можно сделать вывод, что модель не имеет ложных срабатываний при нормальном сетевом трафике.

Выбор алгоритма классификатора. Для решения поставленной задачи рассматривались алгоритмы, представленные в табл. 2. Это основные алгоритмы, которые используются в современном машинном обучении для классификации. А задача обнаружения сетевых вторжений в данном исследовании сводится к разбиению признаков на классы, которые соответствуют тем или иным атакам. Причем, целесообразно чтобы количество классов определялось самими алгоритмом, поскольку в реальных условиях невозможно предугадать, сколько различных признаков атак содержит подозрительный трафик. Качество ответов классификаторов определялось по доле правильных ответов модели обнаружения сетевых вторжений (точности) на выборке для обучения и собственной сбалансированной выборке. Также учитывалось время работы алгоритма, поскольку время

обучения является весьма существенным фактором для работы модели. Для исследования модели была выбрана библиотека sklearn. Полученные значения точности и времени обучения для обучающей выборки приведены в табл.2.

Таблица 2. Результаты оценки качества классификаторов

Table 2. Results of classifier quality assessment

Алгоритм Algorithm	Точность Accuracy	Время выполнения, с Lead time
Дерево решений (CART, sklearn.tree.DecisionTreeClassifier)	0.997	22
Метод k ближайших соседей (KNN, sklearn.neighbors.KNeighborsClassifier)	0.976	30
Случайный лес (RF, sklearn.ensemble.RandomForestClassifier)	0.998	120
Байесовский классификатор (NB, sklearn.naive_bayes.GaussianNB)	0.867	46
Метод опорных векторов (SVM, sklearn.svm.SVC)	0.789	480

Наилучшие результаты на выборке для обучения показали дерево решений и случайный лес, однако на реальном сетевом трафике, в ходе описанных выше экспериментов, случайный лес дал лучший результат, чем дерево решений, хотя и уступал дереву решений в скорости. Поэтому для построения модели использовался алгоритм Random Forest Classifier. Число деревьев подбиралось экспериментально, в цикле, с проверкой попадания признака атаки в класс из тестовой выборки.

Обсуждение результатов. После формирования признакового пространства для обучения модели использовался Random Forest Classifier, который показал хорошие результаты на предварительных испытаниях, с числом деревьев 50. Точность на выходе модели на обучающем множестве признаков составила 0.98. В качестве эксперимента, для оценки работоспособности модели был взят нормальный трафик (без атак). На рис. 8 представлены результаты обнаружения атак для нормального трафика (атак не обнаружено) и аномального трафика (обнаружено 2170 признаков атак).

```
Total operation time: 0.014685392379760742 seconds
Benign records detected (0), attacks detected (1):
{0: 59}
```

а)

```
Total operation time: 0.04003190994262695 seconds
Benign records detected (0), attacks detected (1):
{0: 5097, 1: 2170}
```

б)

Рис. 8. Результат работы модели на нормальном (а) и аномальном (б) трафике

Fig. 8. The result of the model's operation on normal (a) and abnormal (b) traffic

Для сравнения точности обнаружения атак использовался также метод k-ближайших соседей (KNN) [15]. Для этого алгоритма точность на выходе модели составляла 0.97, что ненамного отличалось от результатов случайного леса. Но при эксперименте с нормальным трафиком модель показала не существующие 5 атак. Этот результат предоставлен на рис. 9.

```
Total operation time: 0.005324363708496094 seconds
Benign records detected (0), attacks detected (1):
{0: 54, 1: 5}
```

Рис. 9. Результат работы модели k-ближайших соседей

Fig. 9. The result of the k-nearest neighbor model

Вывод. В ходе работы была разработана модель для обнаружения сетевых вторжений, которая показала точность обнаружения на реальном трафике 0,99. Для обучения моделей была подготовлена выборка с признаками нормального и аномального трафика, причем она была прорежена и сбалансирована в результате предварительного статистического анализа. Были отобраны пять алгоритмов машинного обучения и протестированы,

как на обучающем множестве признаков, так и на реальном тестовом множестве, полученном экспериментально. По результатам экспериментов был отобран классификатор случайного леса Random Forest Classifier, как показавший наилучшие результаты.

Качество проверки корректности работы модели на реальном сетевом трафике проводилось в пять этапов: проверка распознавания сканирования портов, DDoS атак, веб-атак нескольких атак одновременно и сетевого трафика без атак. Распознавание сканирования портов происходит с высокой точностью (0,99), как при быстрой DDoS атаке, так и при медленной модель может их распознать, но количество записей не соответствует реальному объему на 17%, веб-атаки являются наиболее сложными для распознавания, но, тем не менее, большинство записей (70%) с ними были найдены правильно, модель не имеет ложных срабатываний при нормальном сетевом трафике.

В работе показано, что система обнаружения сетевых вторжений на основе машинного обучения может решить проблему гибкой защиты, которая могла бы адаптироваться под постоянно меняющийся характер сетевых атак, поскольку одним из самых важных преимуществ машинного обучения в выявлении сетевых вторжений является способность обучаться признакам атак и выявлять случаи, которые не характерны для тех, что наблюдались ранее. К проблеме, которая требует дальнейшего рассмотрения, относится время, затраченное на обучение модели, потому что для такого рода систем важно, чтобы они постоянно доучивались, поскольку в реальном мире постоянно появляются новые виды угроз. Результаты исследования могут быть интересны разработчикам DLP-систем, системным администраторам и DevOps инженерам наряду с уже существующими средствами предотвращения сетевых вторжений.

Библиографический список:

1. Sheluhin, O. I. Comparative analysis of informative features quantity and composition selection methods for the computer attacks classification using the unsw-nb15 dataset / O. I. Sheluhin, V. P. Ivannikova // T-Comm. – 2020. – Vol. 14. – No. 10. – P. 53-60. – DOI: 10.36724/2072-8735-2020-14-10-53-60.
2. Yang, W. Security detection of network intrusion: application of cluster analysis method / W. Yang // Computer Optics. – 2020. – Vol. 44. – No. 4. – P. 660-664. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-657.
3. Третьяков И. А. Оптимизация SQL-запросов / И. А. Третьяков, Е. Н. Кожекина, И. В. Журавлёв // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2021. – № 2. – С. 39-49. – EDN: RPSKQQ.
4. Третьяков И. А. Безопасность облачных технологий на тестируемом WEB сервере / И. А. Третьяков, Е. Н. Кожекина, Б. В. Гайван // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2021. – № 3. – С. 49-62. – EDN: IVEBAS.
5. Safonov L. Unsupervised anomaly detection in network traffic using deep autoencoding gaussian mixture model / L. Safonov // International Journal of Open Information Technologies. – 2021. – Vol. 9. – No. 9. – P. 109-112.
6. Третьяков И. А. Выявление проблем безопасности веб-сайтов посредством DoS-атаки / И. А. Третьяков, Е. Н. Кожекина, К. Е. Лебедев // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2022. – № 1. – С. 19-32. – EDN: UOSGYS.
7. Черникова Е. И. Анализ сетевого трафика с использованием метода машинного обучения / Е. И. Черникова // Аллея науки. – 2019. – Т. 1. – № 6(33). – С. 921-925. – EDN BSYXMW.
8. Кажемский М. А. Многоклассовая классификация сетевых атак на информационные ресурсы методами машинного обучения / М. А. Кажемский, О. И. Шелухин // Труды учебных заведений связи. – 2019. – Т. 5. – № 1. – С. 107-115. – DOI: 10.31854/1813-324X-2019-5-1-107-115.
9. Liu, H. Machine Learning and Deep Learning Methods for Intrusion Detection Systems: A Survey / H. Liu, B. Lang // Applied Sciences. – 2019. – Vol. 9. – No. 20:4396. – DOI: 10.3390/app9204396.
10. Utkin, L. V. A deep forest classifier with weights of class probability distribution subsets / L. V. Utkin, M. S. Kovalev, A. A. Meldo // Knowledge-Based Systems. – 2019. – Vol. 173. – P. 15-27. – DOI: 10.1016/j.knosys.2019.02.022.
11. Машинное обучение для анализа и классификации шифрованного сетевого трафика / В. А. Мулюха, Л. Ю. Лабошин, А. А. Лукашин, Н. В. Нашивочников // Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям. – 2020. – Т. 1. – С. 238-241. – EDN XYQCZP.
12. Ahmed, H. A. Network intrusion detection using oversampling technique and machine learning algorithms / H. A. Ahmed, A. Hameed, N. Z. Bawany // PeerJ Computer science. – 2022. – Vol. 8. – No. e820. – DOI: 10.7717/peerj-cs.820.
13. Intrusion Detection Evaluation Dataset (CIC-IDS2017). [Электронный ресурс] – URL: <https://www.unb.ca/cic/datasets/ids-2017.html> (Дата обращения 22.12.2022)

14. Scikit-learn. sklearn.ensemble.RandomForestClassifier. [Электронный ресурс] – URL: <https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.ensemble.RandomForestClassifier.html> (Дата обращения 22.12.2022)
15. Метод k-ближайших соседей (k-nearest neighbour). [Электронный ресурс] – URL: <https://proglab.io/p/metod-k-blizhayshih-sosedey-k-nearest-neighbour-2021-07-19> (Дата обращения 22.12.2022)

References:

1. Sheluhin O. I. Comparative analysis of informative features quantity and composition selection methods for the computer attacks classification using the unsw-nb15 dataset. O. I. Sheluhin, V. P. Ivannikova. *T-Comm*. 2020; 14(10): 53-60. – DOI: 10.36724/2072-8735-2020-14-10-53-60.
2. Yang, W. Security detection of network intrusion: application of cluster analysis method. *Computer Optics*. 2020; 44(4): 660-664. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-657.
3. Tretiakov I. A. Optimization of SQL queries / I. A. Tretiakov, E. N. Kozhokina, I. V. Zhuravlev. *Bulletin of Donetsk National University. Series G: Technical Sciences*. 2021;2: 39-49. – EDN: RPSKQQ. (In Russ)
4. Tretiakov, I. A. Security of cloud technologies on the tested WEB server / I. A. Tretiakov, E. N. Kozhikina, B. V. Gaivan. *Bulletin of Donetsk National University. Series G: Technical Sciences*. 2021;3: 49-62. – EDN: IVEBAS. (In Russ)
5. Safonov L. Unsupervised anomaly detection in network traffic using deep autoencoding gaussian mixture model / L. Safonov. *International Journal of Open Information Technologies*. 2021; 9(9): 109-112.
6. Tretiakov, I. A. Identification of website security problems through DoS attacks / I. A. Tretiakov, E. N. Kozhekina, K. E. Lebedev. *Bulletin of Donetsk National University. Series G: Technical Sciences*. 2022;1: 19-32. – EDN: UOSGYS. (In Russ)
7. Chernikova E. I. Network traffic analysis using machine learning method. *Alley of Science*. 2019; 1(6(33)): 921-925. – EDN BSYXMW. (In Russ)
8. Kezhemsky, M. A. Multiclass classification of network attacks on information resources by machine learning methods / M. A. Kazhemy, O. I. Shelukhin. *Proceedings of educational institutions of communication*. 2019; 5(1):107-115. – DOI: 10.31854/1813-324X-2019-5-1-107-115. (In Russ)
9. Liu, H. Machine Learning and Deep Learning Methods for Intrusion Detection Systems: A Survey / H. Liu, B. Lang. *Applied Sciences*. 2019; 9(20):4396. – DOI: 10.3390/app9204396.
10. Utkin, L. V. A deep forest classifier with weights of class probability distribution subsets / L. V. Utkin, M. S.Kovalev, A.A. Meldo. *Knowledge-Based Systems*. 2019;173:15-27. – DOI: 10.1016/j.knosys.2019.02.022.
11. Machine learning for analysis and classification of encrypted network traffic / V. A. Mulukha, L. Yu. Lapshin, A. A. Lukashin, N. V. Nashivochnikov. *International Conference on Soft Computing and Measurements*. 2020;1: 238-241. – EDN XYQCZP. (In Russ)
12. Ahmed H. A. Network intrusion detection using oversampling technique and machine learning algorithms / H.A. Ahmed, A. Hameed, N. Z. Bawany. *PeerJ Computer science*. 2022; 8(8):20. DOI: 10.7717/peerj-cs.820.
13. <https://www.unb.ca/cic/datasets/ids-2017.html> (accessed 22.12.2022)
14. <https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.ensemble.RandomForestClassifier.html> (accessed 22.12.2022)
15. <https://proglab.io/p/metod-k-blizhayshih-sosedey-k-nearest-neighbour-2021-07-19> (accessed 22.12.2022)

Сведения об авторах:

Бабичева Маргарита Вадимовна, старший преподаватель кафедры радиопизики и инфокоммуникационных технологий; mv.babicheva60@gmail.com

Третьяков Игорь Александрович, заместитель декана по научной работе, доцент кафедры радиопизики и инфокоммуникационных технологий; i.tretiakov@mail.ru ORCID 0000-0002-7816-1563

Information about authors:

Margarita V. Babicheva, Senior Lecturer, Department of Radiophysics and Information and Communication Technologies; mv.babicheva60@gmail.com

Igor A. Tretiakov, Deputy Dean for Research, Associate Professor of the Department of Radiophysics and Infocommunication Technologies; i.tretiakov@mail.ru ORCID 0000-0002-7816-1563

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 16.01.2023.

Одобрена после рецензирования/ Revised 12.02.2023.

Принята в печать/Accepted for publication 12.02.2023.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 004.056

DOI: 10.21822/2073-6185-2023-50-1-62-74

Оригинальная статья /Original Paper

Методика оценки защищённости автоматизированной системы управления критической информационной инфраструктуры от DDoS-атак на основе имитационного моделирования методом Монте-Карло

В.А. Воеводин, В.С. Черняев, Д.С. Буренок, И.В. Виноградов

Национальный исследовательский университет
«Московский институт электронной техники»,
124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является разработка методики оценки защищённости автоматизированной системы управления критической информационной инфраструктуры (КИИ) от DDoS-атак. **Цель разработки методики** – предоставить лицу, принимающему решение (ЛПР), научно обоснованный инструмент для оценки риска реализации DDoS-атаки. **Метод.** Для достижения заявленной цели исследования использовалось имитационное моделирование на основе метода Монте-Карло. **Результат.** Подтверждена целесообразность применения имитационного моделирования методом Монте-Карло для оценки вероятности отказа сервера в условиях DDoS-атак. Был сделан вывод о том, что сервер может рассматриваться как система массового обслуживания, однако поток поступающих заявок в условиях DDoS-атак не является пуассоновским, поэтому применение аналитических выражений для оценки вероятности отказа является некорректным. Результаты моделирования позволяют ЛПР оценить вероятность отказа сервера и принять организационные и технические меры для повышения уровня защищённости. Анализ результатов моделирования показал эффективность повышения производительности сервера путём увеличения каналов обслуживания. **Вывод.** Разработанная методика будет полезна при проведении аудита информационной безопасности организации для обоснования размера ее страховой премии в рамках страхования киберрисков. Возможное направление дальнейших исследований – изучение вопроса защищённости вычислительной сети с учётом особенностей конкретной топологии.

Ключевые слова: АСУ ТП, имитационное моделирование, метод Монте-Карло, DDoS-атака, критическая информационная инфраструктура

Для цитирования: В.А. Воеводин, В.С. Черняев, Д.С. Буренок, И.В. Виноградов. Методика оценки защищённости автоматизированной системы управления критической информационной инфраструктуры от DDoS-атак на основе имитационного моделирования методом Монте-Карло. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023; 50(1):62-74. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-1-62-74

Assessment methodology for security of an automated control system of critical information infrastructure against DDoS attacks based on Monte Carlo simulation

V.A. Voevodin, V.S. Chernyaev, D.S. Burenok, I.V. Vinogradov

National Research University of Electronic Technology,
1 Shokina Square, Moscow, Zelenograd 124498, Russia

Abstract. Objective. The purpose of the study is to develop a methodology for assessing the security of an automated control system of critical information infrastructure from DDoS attacks. The purpose of the methodology development is to provide the decision-maker with a scientifically sound tool for assessing the risk of implementing a DDoS attack. **Method.** To achieve the stated goal of the study, simulation modeling based on the Monte Carlo method was used. **Result.** The expediency of using Monte Carlo simulation to assess the probability of server failure under DDoS attacks is confirmed. It was concluded that the server can be considered as a

queuing system, however, the flow of incoming applications under DDoS attacks is not Poisson, so the use of analytical expressions to assess the probability of failure is considered incorrect. The simulation results allow the decision-maker to assess the probability of server failure and make organizational and technical decisions to increase the level of security. Analysis of the simulation results showed the effectiveness of improving server performance by increasing service channels. **Conclusion.** Thus, the developed methodology will be useful in conducting an information security audit of an organization to justify the amount of its insurance premium in the framework of cyber risk insurance. A possible direction for further research is to study the issue of computer network security, taking into account the features of a specific topology.

Keywords: automated process control system, simulation modeling, Monte Carlo method, DDoS attack, critical information infrastructure

For citation: V.A. Voevodin, V.S. Chernyaev, D.S. Burenok, I.V. Vinogradov. Assessment methodology for security of an automated control system of critical information infrastructure against DDoS attacks based on Monte Carlo simulation. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science. 2023; 50 (1): 62-74. DOI: 10.21822 /2073-6185-2023-50-1-62-74

Введение. Автоматизированная система управления технологическим процессом (АСУ ТП) – это целостное решение технических и программных средств, которые предназначены для автоматизации управления технологическим оборудованием на промышленных предприятиях [1]. АСУ ТП применяются на объектах КИИ, к которым согласно 187-ФЗ «О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации» относятся объекты критической информационной инфраструктуры, а также сети электросвязи, используемые для организации взаимодействия таких объектов. Для информационной инфраструктуры АСУ ТП актуален ряд атак, в том числе атаки типа «отказ в обслуживании».

Распределённая атака типа «отказ в обслуживании» или DDoS-атака является одной из наиболее распространённых атак на сетевую инфраструктуру. Механизм данной атаки заключается в создании потока заявок, превышающего максимальный ресурс сервера по обработке запросов, что приводит к отказу в его работе. Источником вредоносных запросов выступают распределённые бот-сети, состоящие из заражённых вирусами компьютеров обычных пользователей, такие компьютеры способны синхронно исполнять команды, передаваемые им с управляющего сервера злоумышленника. Существуют специальные программы и сервисы, с помощью которых возможно организовать DDoS-атаку. Отличительной чертой подобного рода атаки является то, что её реализации практически не оставляет юридически значимых улик. Реализация подобных атак грозит компании существенными финансовыми и репутационными рисками. Для коммерческих организаций финансовый ущерб в среднем достигает порядка нескольких тысяч долларов [2].

Постановка задачи. Вопрос защищённости АСУ от различных угроз, в том числе DDoS-атак, остаётся актуальным и на сегодняшний день. Разработка решений задачи защиты АСУ послужили основой для создания различных практик в этой области, описанных в зарубежных, международных и российских руководящих документах. Актуальность обуславливается необходимостью создания инструмента оценки защищённости АСУ ТП от DDoS-атак для предоставления ЛПР возможности снизить риск возникновения подобной ситуации и особенно обуславливается тем, что вывод из строя АСУ может привести не только к финансовым потерям, но и стать угрозой для жизни и здоровья людей.

Начиная с 2018 года, в России начала формироваться нормативно-правовая база в области безопасности КИИ. Именно тогда вступил в силу федеральный закон от 26.07.2017 г. № 187-ФЗ «О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации». Данный закон регулирует правовые отношения в области обеспечения безопасности объектов информационной инфраструктуры РФ, имеющих особую значимость для экономики страны. Под действия закона попадают субъекты, работающие в сфере здравоохранения, науки, транспорта, связи, энергетики, банковской сфере. Еще к субъектам КИИ относятся предприятия топливно-энергетического комплекса, атомной

энергии, оборонной, ракетно-космической, горнодобывающей, металлургической и химической промышленности.

Правила категорирования КИИ устанавливаются Постановлением Правительства РФ от 8 февраля 2018 г. № 127 «Об утверждении Правил категорирования объектов критической информационной инфраструктуры Российской Федерации, а также перечня показателей критериев значимости объектов критической информационной инфраструктуры Российской Федерации и их значений».

Существуют следующие показатели значимости: социальная, политическая, экономическая, экологическая, а также значимость для обеспечения обороны страны, безопасности государства и правопорядка. Для каждого показателя конкретные значения показателя значимости присваиваются в зависимости от масштаба последствий в случае возникновения инцидентов на объектах КИИ. Нарушение процессов функционирования различных объектов КИИ может иметь различные негативные последствия: от экономического ущерба до причинения вреда жизни и здоровью граждан и угрозам международного уровня. При проектировании системы защиты КИИ учитывается специфика конкретного объекта и, соответственно, применимость к нему других нормативно-правовых актов. Так, если КИИ относится к информационной системе персональных данных, то данный объект попадает под действие [5], и, следовательно, обработка персональных данных должна осуществляться в соответствии с требованиями [6]. Если же объект КИИ относится к государственной информационной системе, определение которой даётся в статье 14 ФЗ-149 «Об информации, информационных технологиях и о защите информации» и которая обрабатывает информацию, не относящуюся к государственной тайне, то требования к защите устанавливаются согласно приказу ФСТЭК России № 17 от 11 февраля 2013 г. «Об утверждении требований о защите информации, не составляющей государственную тайну, содержащейся в государственных информационных системах».

АСУ ТП функционируют на объектах КИИ промышленного комплекса. Федеральной службой по техническому и экспортному контролю РФ был разработан ряд требований по защите таких объектов, изложенных в Приказе ФСТЭК России от 14 марта 2014 г. № 31 «Об утверждении требований к обеспечению защиты информации в автоматизированных системах управления производственными и технологическими процессами на критически важных объектах, потенциально опасных объектах, а также объектах, представляющих повышенную опасность для жизни и здоровья людей и для окружающей природной среды». Согласно документу обеспечение защиты состоит из пяти этапов:

- 1) формирование требований;
- 2) разработка системы защиты;
- 3) внедрение системы защиты;
- 4) обеспечение защиты в процессе эксплуатации;
- 5) обеспечение защиты при выводе из эксплуатации.

Согласно Приказу ФСТЭК России № 31 автоматизированная система управления технологическим процессом имеет многоуровневую структуру и состоит из трех уровней:

- верхний – уровень операторского управления;
- средний – уровень автоматического управления;
- нижний – уровень ввода (вывода) данных исполнительных устройств.

К первому уровню относятся операторские, инженерные автоматизированные рабочие места, промышленные серверы (SCADA-серверы), телекоммуникационное оборудование и каналы связи; ко второму уровню относятся программируемые логические контроллеры; к третьему – датчики и исполнительные механизмы.

Следует отметить, что в нормативно-правовой базе, посвящённой информационной безопасности АСУ ТП, важное место занимают документы, регулирующие безопасность отдельных отраслей промышленности. Так, в 2011 году появился №256-ФЗ «О безопасности объектов ТЭК», обязывающий проектировать и внедрять системы обеспечения безопасности объектов ТЭК. Согласно статье 11 данного ФЗ субъекты отрасли должны использовать системы защиты

информации и информационно-телекоммуникационных сетей от неправомерного доступа, уничтожения, модифицирования, блокирования и иных неправомерных действий, а также обеспечивать функционирование таких сетей. Для этого требуется выполнения ряда организационных и технических мероприятий: от определения угроз безопасности до подготовки специалистов в области обеспечения безопасности объектов топливно-энергетического комплекса.

Требования к безопасности тоже должны быть учтены при проектировании. Во время проведения критических операций должен быть обеспечен контроль со стороны человека. Кроме этого, в [7] определён ряд особенностей АСУ ТП, отличающий её от обыкновенной информационной системы:

- АСУ ТП является системой реального времени, следовательно, время реакции критично, особенно в аварийных ситуациях;
- задержки и потери данных неприемлемы;
- для АСУ ТП перезагрузка может быть невозможна вследствие требований к готовности, которые обуславливают необходимость резервирования;
- первостепенную важность имеет безопасность людей, а не возможное нарушение свойств информации (конфиденциальности, целостности, доступности), которая, в свою очередь, зависит от безопасности физических процессов;
- важную роль играет отказоустойчивость – даже кратковременный простой может быть неприемлем;
- наряду с распространёнными операционными системами используются специализированные операционные системы, в том числе без встроенных функций безопасности;
- изменения программного обеспечения (ПО) тщательно контролируются поставщиками ПО вследствие специализированных алгоритмов управления, влияния на конфигурацию аппаратных средств и значительных затрат на лицензирование изменений;
- изменение ПО должны быть протестированы, и должно быть подтверждено сохранение целостности системы после внесения изменений;
- системы разработаны для поддержки промышленных процессов и могут не иметь достаточной памяти или вычислительных ресурсов для поддержки функций безопасности;
- в АСУ ТП применяются специально разработанные коммуникационные протоколы и используются специально проложенные сети;
- продолжительность жизненного цикла может достигать 10-15 лет, для некоторых объектов может достигать до 30 лет.

На основе исходных данных, полученных путём анализа существующих подходов к защите АСУ ТП в России и за рубежом, ставится задача разработки методики оценки защищенности автоматизированной системы управления критической информационной инфраструктуры от DDoS-атак с применением допустимых для решения поставленной задачи методов. Цель применения методики – получение ЛПР информации, достаточной для принятия решения об обработке данного риска и минимизации возможных потерь, либо принятия решения о необходимости принятия риска.

Методы исследования. Применение методов теории систем массового обслуживания (СМО) позволяет решить задачу по оценке вероятности отказа сервера, но при этом требуется принять допущения, которые могут привести к ошибочным результатам. Система массового обслуживания предназначена для обработки заявок и имеет некоторое число обслуживающих единиц – каналов. Согласно [8] различают одноканальные системы с ограничением на длину очереди, одноканальные системы с отказами, многоканальные системы с отказом, многоканальные системы с ограниченной очередью, а также одноканальные и многоканальные системы без ограничений.

Под заявкой понимают объект, поступающий в СМО и требующий обслуживания в обслуживающем приборе. Соответственно, поток заявок – это совокупность заявок, рас-

пределенных во времени. Поток представляет собой однородные события, которые следуют друг за другом в случайные моменты времени. В случае поступления требований через определённые равные промежутки времени поток называется регулярным. Важнейшими характеристиками являются интенсивность поступления заявок в систему λ и интенсивность обслуживания заявок μ .

Первая величина характеризует частоту появления событий, поступающих в систему массового обслуживания, вторая, соответственно, число заявок, обслуживаемых в единицу времени. Отношение этих двух величин ρ называется коэффициентом загрузки СМО. Для примера, описание процесса в терминах теории СМО можно представить в виде вербальной модели. Пусть на сервер поступают заявки с некоторой интенсивностью λ . При функционировании в штатном режиме закон распределения входного потока этих заявок можно рассматривать как пуассоновский на достаточно большом промежутке времени. Обслуживание поступивших заявок происходит с интенсивностью μ . В качестве обслуживающих каналов выступают процессы-обработчики. Очередь заявок соответствует очереди запросов, приходящих на сервер. В случае занятости всех каналов и мест в очереди происходит отказ, что соответствует переполнению очереди запросов на реальном сервере, что приводит к ошибке «502 Bad Gateway».

Таким образом, разработанная модель соответствует многоканальной системе с ограниченной очередью и ограниченным временем ожидания в очереди. Дисциплина ожидания FIFO (First In, First Out): чем раньше заявка попала в очередь, тем раньше она будет обслужена, приоритет заявок отсутствует.

На рис. 1 представлен размеченный граф состояний системы, в котором состояние S_0 соответствует ситуации, когда все каналы свободны и очередь отсутствует, состояние S_1 соответствует ситуации, когда занято 1 канал, очереди нет, состояние S_{n+i} показывает, что обслуживанием заявок заняты все n каналов в очереди находятся i каналов, состояние S_{n+m} соответствует случаю, когда все n каналов и m мест в очереди заняты. Величина v характеризует интенсивность ухода заявок из очереди, что соответствует уходу заявок из очереди сервера вследствие превышения максимального времени нахождения в ней и наступлению ошибки 504 Gateway Time-out.

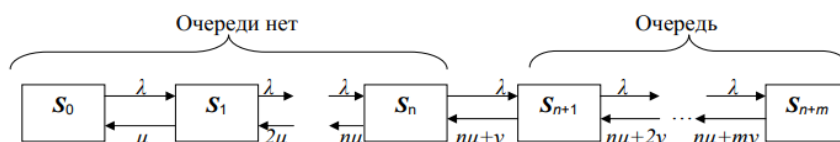


Рис.1. Обобщённый граф состояний многоканальной системы с ограниченной очередью и ограниченным временем ожидания в очереди

Fig.1. Generalized graph of states of a multichannel system with a limited queue and a limited waiting time in the queue

Существуют аналитические методы расчёта вероятности пребывания системы в каждом из l состояний. Например, для рассматриваемой многоканальной системы с ограниченной очередью и временем ожидания в очереди справедливы следующие соотношения для расчёта среднего числа заявок, находящихся в очереди (1), и среднего числа заявок, обслуживаемых в СМО (2) [9]. Однако формулы, приведенные в [9], для решения поставленной задачи не пригодны, так как при моделировании DDoS-атаки на сервер в отдельный момент времени t на сервер может прийти несколько заявок, что нарушает требования ординарности для потока входящих заявок, и, следовательно, его уже нельзя считать пуассоновским без грубых допущений, которые могут привести к недопустимым ошибочным результатам.

Потребность в исследовании сложных систем послужила толчком для развития теоретических методов познания, важное место среди которых занимает моделирование. Сущность моделирования заключается в воспроизведении отдельных свойств реальных объектов, предметов и явлений с помощью других объектов, процессов, явлений, либо с помощью абстракт-

ного описания. Моделирование всегда опирается на объект исследования, так как информация об объекте и является основой для создания модели. Моделирование особенно актуально на сегодняшний день, так как потребность в исследовании сложных систем заметно возросла. Для сложных систем характерен ряд признаков [10]:

1. Целостность и возможность разделения на части – данное свойство отражает возможность разделения системы на подсистемы, но и свидетельствует о том, что система способна функционировать как единая структура;
2. Наличие связей – это свойство выражается в наличии некоторых каналов передачи информации между элементами, системами, элементами системы и внешним миром;
3. Наличие организации – данное свойство означает, что связи элементов некоторым образом упорядочены и образуют структуру системы;
4. Наличие интегративных качеств – данное свойство тоже означает, что, хотя система зависит от составных элементов, она имеет качества, присущие ей в целом. Данный факт позволяет сделать важный вывод о том, что изучение сложной системы не может быть сведено только к изучению отдельных её частей, и, наоборот, система в целом исследуется, исходя из свойств отдельных её составляющих;
5. Уникальность – сложные системы, как правило, отличаются уникальностью, что требует создания отдельной модели для изучения каждой такой системы;
6. Случайность и неопределённость действующих факторов;
7. Учёт многочисленных факторов, влияющих на систему, увеличивает объём вычислений и существенно усложняет модель, однако вместе с этим повышает её точность;
8. Многокритериальность оценок процессов, протекающих в системе;
9. Невозможность однозначной оценки обуславливается наличием множества подсистем и различных показателей.

Согласно [11] различают следующие виды моделирования: детерминированное, стохастическое, динамическое, дискретное, непрерывное, дискретно-непрерывное, мысленное, наглядное, гипотетическое, аналоговое, макетирование, языковое, аналитическое, математическое моделирование, а также имитационное моделирование.

Следует отметить, что в последнее время наблюдается комбинирование различных видов моделирования. Так, например, имитационное моделирование сочетает в себе признаки концептуального моделирования на ранних этапах формирования моделей и логико-математическое для описания отдельных подсистем и процессов модели, а также при обработке и анализе результатов вычислительного эксперимента. Также, имитационное моделирование наряду со структурно-функциональным моделированием относится к методам компьютерного моделирования.

Метод имитационного моделирования является экспериментальным методом исследования реальной системы по ее компьютерной модели, сочетая особенности экспериментального подхода и использование средств вычислительной техники. То есть, имитационная модель состоит из совокупности реальной системы, логико-математической модели, имитационной модели и электронно-вычислительной машины. Отличительной особенностью имитационного моделирования является сохранение логической структуры моделируемых объектов и динамики взаимодействия элементов, достигаемое посредством описания состояний системы с помощью наборов переменных состояний, изменение которых характеризует переход из состояния в состояние. Таким образом, имитационное моделирование позволяет отразить изменение состояния системы во времени.

Для описания динамического изменения процессов в имитационном моделировании используется модельное время. Модельное время выступает некоторым временным эталоном в системе, что позволяет синхронизировать все протекающие в системе процессы. Различают пошаговое и событийное изменение модельного времени.

В первом случае изменение времени происходит постоянно с одинаковой минимально возможной длиной шага, во втором случае изменение времени происходит только при изменении состояния системы. Второй способ более эффективен с точки зрения использования ма-

шинного времени, поэтому является более распространённым. На основе этих двух подходов к организации машинного времени строится классификация имитационных моделей. Выделяют непрерывные, дискретные и непрерывно-дискретные имитационные модели. В первом виде моделей изменение состояния моделируемой системы происходит непрерывно и часто описывается системой дифференциальных уравнений, поэтому продвижение модельного времени будет зависеть от численного решения этих уравнений.

Общая последовательность действий при проведении имитационного моделирования следующая: после изучения реальной системы происходит построение логико-математической модели, затем следует разработка моделирующего алгоритма, построение имитационной модели, планирование и проведение имитационных экспериментов, обработка и анализ результатов и, наконец, принятие решений. Имитационное моделирование является универсальным средством для исследования сложных систем и представляет собой логико-алгоритмическое описание поведения отдельных элементов системы и правил их взаимодействия, отображающих последовательность событий, возникающих в моделируемой системе. Согласно [12] имитационные модели подразделяются на статические (в случае, когда система остаётся неизменной в течение времени), динамические, детерминированные (в случае, когда система не содержит случайных величин) стохастические, непрерывные и дискретные. Используемый в настоящем исследовании метод Монте-Карло относится к методам статического, непрерывного, стохастического моделирования.

Представленное выше описание сервера в терминах теории СМО подходит, например, для серверов с Nginx. Количество каналов, длина очереди, максимальное время пребывания в очереди задаются в конфигурационных файлах Nginx параметрами «worker_connections», «backlog», «timeout», соответственно. Схема обработки запросов Nginx представлена на рис. 2. Множество других сетевых приложений, например, Apache, устроены аналогично.

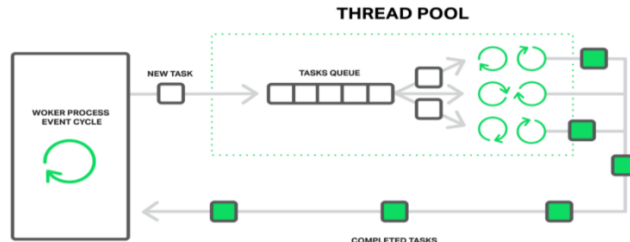


Рис.2. Nginx структура рабочего процесса
Fig.2. Nginx worker process structure

В случае если DDoS-атака ведется на уровне приложения, важно учитывать обращение сервера к базе данных. Она может располагаться как внутри компьютерной сети, так и с привлечением облачных сервисов, центров обработки данных. На транспортном и сетевом уровне обращений к базе данных не происходит, взаимодействие с ней можно не моделировать. Существуют аналитические выражения, с помощью которых можно рассчитать вероятность нахождения СМО в каждом из состояний, а также вероятность отказа. Однако в условиях DDoS-атак их применение является некорректным, так как при моделировании DDoS-атаки на сервер в отдельный момент времени на сервер может прийти несколько заявок, что нарушает требования ординарности для потока входящих заявок и, следовательно, его уже нельзя считать пуассоновским без грубых допущений, которые могут привести к недопустимым ошибочным результатам [13]. Таким образом, классический инструментарий теории СМО является непригодным для решения поставленной задачи. Выходом является применение имитационного моделирования методом Монте-Карло. Имитационное моделирование позволяет отслеживать изменения состояний системы во времени и хорошо применимо для моделирования случайных процессов, таких как DDoS-атаки [14, 15]. В общем случае, разработка имитационной модели дискретных систем, имеющих стохастический характер функционирования, к которым относятся СМО, производится в следующем порядке:

1. Задание закона распределения случайной величины;
2. Генерация значений случайных величин с заданным законом распределения;
3. Формирование потоков заявок и имитация обслуживания;
4. Моделирование очередей заявок на обслуживание;
5. Обработка результатов моделирования.

В качестве средства для проведения в настоящем исследовании использовался пакет электронных таблиц «Microsoft Excel». На сегодняшний день имитация с помощью табличных процессоров выросло в отдельное направление моделирования, имеющее свои особенности. Сторонники подобного моделирования отмечают, что использование данных систем позволяет получить лучшее понимание происходящих процессов по сравнению с применением специализированного ПО. Подобное ПО имеет высокую стоимость и требует существенных временных затрат для его изучения, а также не позволяет понять используемые механизмы, работая, фактически, по принципу «чёрного ящика». Однако, вместе с этим, такие среды предоставляют больше возможностей и позволяют моделировать сложные системы. При реализации моделей в «Microsoft Excel» используют три основных подхода к проведению имитации: ориентированный на события, ориентированный на процессы, сканирования активностей (рис. 3).



Рис.3. Связь событий, действий и процесса
Fig.3. Connection of events, actions and process

Первый подход описывает изменения в системе, происходящие в момент совершения каждого случайного события (прибытие заявки, завершение обслуживания), и, при его реализации с помощью электронных таблиц, как правило, используется одна строка для каждого события. При использовании процессно-ориентированного подхода происходит моделирование последовательности событий для каждой заявки, и для его реализации обычно используется одна строка для каждого требования (применяется при моделировании СМО). Подход сканирования активностей описывает действия, возникающие в системе в течение фиксированного интервала времени (например, в день, неделю, месяц, год), и при его реализации обычно используется одна строка для каждого временного интервала.

Рассмотрим основные преимущества использования пакета «Microsoft Excel» [16]:

1. Данный пакет насчитывает большое количество различных функций – математических, статистических, финансовых, и других видов встроенных функций. Также имеются специальные функции для генерирования случайных величин;
2. Электронные таблицы позволяют хранить данные в удобном виде и осуществлять доступ к ним;
3. Имеется возможность построения графиков и диаграмм;
4. Программный пакет содержит встроенный язык Visual Basic for Applications;
5. Данное ПО является широко распространенным, так как входит в базовый набор программ пакета «Microsoft Office»;
6. Возможен экспорт в другие программные продукты;
7. Используемые математические функции проверены и верифицированы;
8. В электронных таблицах имеется возможность просмотра всех формул, занесенных в ячейки таблицы, что повышает доверие к результатам моделирования, а с реализованной моделью пользователь может экспериментировать и оценивать результа-

ты без привлечения специалистов в области имитационного моделирования, что также повышает доверие к получаемым результатам;

9. Программный пакет имеет достаточную производительность для решения поставленной задачи.

Обсуждение результатов. Имитационная модель функционирует по следующему алгоритму:

1. Временной шаг задаётся в столбце «Время» и выбран равным 0,1 секунды.
2. В отдельном блоке таблицы задаются интенсивность поступления заявок λ и интенсивность обслуживания μ . Длина очереди и количество каналов являются константами.

λ	10
μ	2
dt	0,1
Максимальное ожидание (в тактах)	6
Длина очереди	3
Количество каналов	3

Рис.4. Блок задания исходных данных

Fig.4. Source data assignment block

3. Приход заявки симулируется функцией генерацией случайного числа от 0 до 1 функцией СЛЧИС() в столбце «RND заявка». Процесс поступления заявки задаётся следующим условием: если случайная величина «RND заявка» меньше произведения λ на dt, то считаем, что заявка поступила. Результат отображается в столбце «Заявка».

4. Столбцы «RND обслужил канал 1», «RND обслужил канал 2», «RND обслужил канал 3» задают случайные величины, характеризующие обслуживание первого, второго и третьего канала соответственно. Событие обслуживание канала симулируется аналогично: если случайная величина «RND обслужил канал 1» меньше произведения μ на dt, то считается, что канал был обслужен. Результат отображается в столбцах «Процесс обслужил канал 1», «Процесс обслужил канал 2», «Процесс обслужил канал 3».

5. Столбцы «Занят канал 1», «Занят канал 2», «Занят канал 3» содержат логический флаг, указывающий на занятость канала или его свободное состояние.

Состояние освобождения каналов (столбцы «Освободился канал 1», «Освободился канал 2», «Освободился канал 3») описывается логическим условием, когда каналы были заняты и их обслужили. Канал 1 получает заявку, если он был свободен или освободился и поступила заявка. Канал 2 получает заявку из очереди, если он свободен и в очереди есть заявки и предыдущий канал (Канал 1) занят. Канал 3 получает заявку из очереди, если он свободен и в очереди есть заявки и предыдущий канал (Канал 2) занят. В имитационной модели отражается событие удаления заявок из очереди при превышении максимального времени ожидания, а также фиксируется время ожидания на каждом из мест в очереди (рис. 5).

заявка была удалена из очереди	занято мест в очереди	время очереди место 1	время очереди место 2	время очереди место 3
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	1	4	0	0
0	1	5	0	0
0	2	5	6	0
0	0	0	0	0

Рис.5. Столбцы, отвечающие за удаление заявок из очереди и фиксацию времени нахождения в очереди

Fig.5. Columns responsible for removing applications from the queue and fixing the time spent in the queue

Количество отказов рассчитывается как отношение отказов к общему числу заявок (рис. 6).

λ	10
μ	2
dt	0,1
Макс ожидание (в тактах)	6
Длина очереди	3
Количество каналов	3
Отказы (Отношение отказов ко всем заявкам)	0,3876

Рис.6. Расчёт количества отказов

Fig.6. Calculating the number of failures

В имитационной модели предусмотрен автоматический вывод результатов последних 100 симуляций по нажатию кнопки «Вывод» (рис. 7).

Кнопка для вывода отказов 100 последних симуляций:		Вывод
10		
11	0,07866075	
12	0,060727127	
13	0,075350701	
14	0,070341423	
15	0,074568289	
16	0,043621399	
17	0,069233761	
18	0,072264836	
19	0,073051948	
20	0,085005903	

Рис.7. Блок вывода результатов последних 100 симуляций

Fig.7. The block for displaying the results of the last 100 simulations

В основе имитационной модели лежит случайный характер прихода заявок в каждый момент времени. Дальнейшее обслуживание заявок и освобождение каналов описывается с помощью логических выражений.

Процент успешных DDoS-атак, равный вероятности отказа сервера, рассчитывается как отношение отказов к общему числу заявок. В качестве параметров первоначальной модели выступают интенсивность поступления заявок λ и интенсивность обслуживания μ , максимальное ожидание заявки в очереди, длина очереди, количество каналов, а также временной шаг dt , который задаётся равным 0,1 секунды. Модель была протестирована при различных величинах отношения λ к μ , что имеет смысл ρ – коэффициента загрузки сервера. Анализ показал, что уже при ситуации, когда интенсивность поступления заявок превышает интенсивность обслуживания в 6,25 раза, вероятность успешной DDoS-атаки оценивается в 51,32%, а при превышении интенсивность поступления заявок в 10 раз вероятность отказа сервера возрастает до 70% (рис. 8).

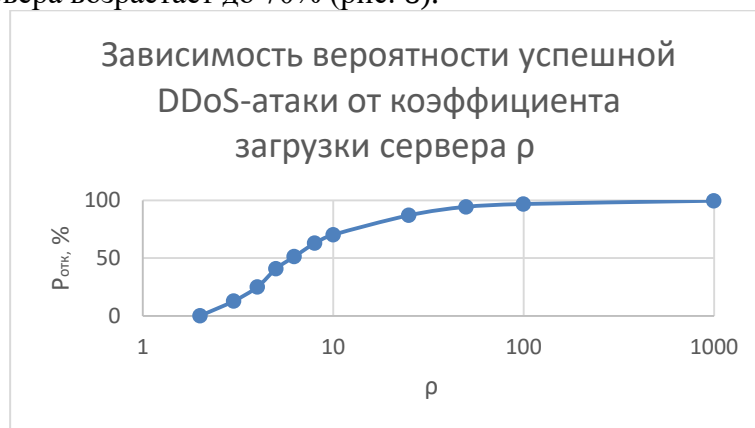


Рис.8. Зависимость вероятности успешной DDoS-атаки от загрузки сервера

Fig.8. Dependence of the probability of a successful DDoS attack on the server load

Для оценки вероятности отказа сервера при большом количестве итераций и произвольном количестве каналов используется программа оценки защищённости сервера от DDoS-атак, принимающая на вход статистику поступления заявок на сервер, длину очереди и максимальное ожидание заявки в очереди [17]. Статистика поступления заявок загружается в виде Excel-файла, в котором первый столбец соответствует поступлению заявок на сервер, последующие столбцы – обслуживанию заявки первым и последующими каналами. Наступление событий поступления заявки и её обслуживания каналом обозначается единицей в соответствующей ячейке, противоположное событие – нулем.

На выходе программа выдаёт вероятность отказа, которая рассчитывается как отношение количество отказов к общему количеству заявок.

Отличительной особенностью программной модели является её универсальность, обуславливаемая гибкостью изменения параметров. Вычислительных ресурсов программы хватает для 10^6 итераций, после чего данные можно выгрузить на диск. На рис. 9 представлен интерфейс программы.

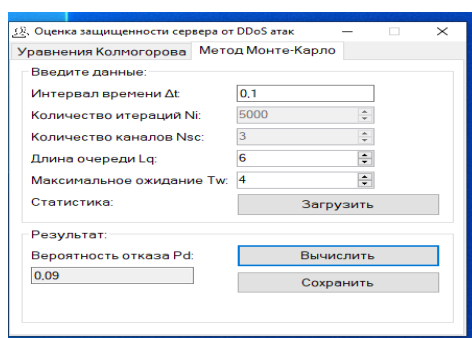


Рис.9. Интерфейс программы
Fig.9. Program interface

Эксперименты, проведённые с моделью, показали, что в условиях высокой интенсивности поступления заявок и высоком значении отношения λ к μ ($\rho = 1000$), что соответствует DDoS-атаке, вероятность отказа снижается на 4-6% при увеличении количества каналов на пять единиц (рис. 10).

Увеличение очереди обслуживания на 100 единиц позволяет снизить вероятность отказа на 1%.

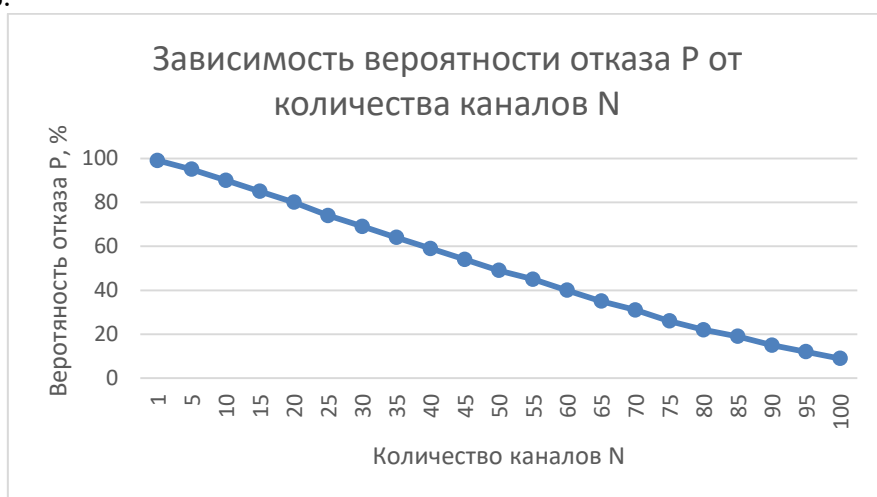


Рис.10. Зависимость вероятности отказа от количества каналов
Fig.10. Dependence of the probability of failure on the number of channels

Так, при начальной вероятности отказа, равной 80%, и длине очереди, равной единице, для снижения вероятности отказа до 50% потребовалось увеличение очереди до 3000 единиц (рис. 11). Полученные результаты свидетельствуют о том, что наиболее эффективным способом снижения вероятности отказа является повышение производительности сервера путём увеличения его каналов обслуживания.

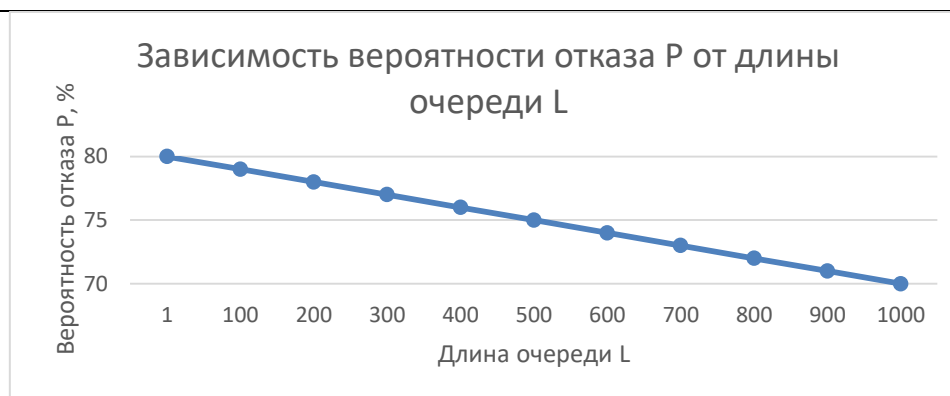


Рис.11. Зависимость вероятности отказа от длины очереди

Fig.11. Dependence of the probability of failure on the length of the queue

Вывод. На основании результатов проведённых исследований показана целесообразность применения имитационного моделирования методом Монте-Карло для оценки вероятности отказа сервера в условиях DDoS-атак. Был сделан вывод о том, что сервер может рассматриваться как СМО, однако поток поступающих заявок в условиях DDoS-атак не является пуассоновским, поэтому применение аналитических выражений для оценки вероятности отказа некорректно. Моделирование позволяет ЛППР оценить вероятность отказа сервера и принять организационные и технические меры для повышения уровня защищённости. Анализ результатов моделирования показал эффективность повышения производительности сервера путём увеличения каналов обслуживания. Таким образом, разработанная методика будет полезна при проведении аудита информационной безопасности организации для обоснования размера ее страховой премии в рамках страхования киберрисков.

Библиографический список:

1. Анализ существующих автоматизированных систем управления технологическим процессом [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-suschestvuyuschih-avtomatizirovannyh-sistem-upravleniya-tehnologicheskim-protsessom/viewer>.
2. Угроза DDoS-атак и неоднозначное к ним отношение [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.kaspersky.ru/blog/ugroza-ddos-atak-i-neodnoznachnoe-k-nim-otnoshenie/3236/>.
3. Федеральный закон от 27.07.2006 N 152-ФЗ "О персональных данных" // СПС КонсультантПлюс.
4. Постановление Правительства РФ от 1 ноября 2012 г. N1119 г.Москва "Об утверждении требований к защите персональных данных при их обработке в информационных системах персональных данных".
5. Постановление Правительства № 162 от 17.02.2018 г. «Об утверждении Правил осуществления государственного контроля в области обеспечения безопасности значимых объектов критической информационной инфраструктуры Российской Федерации».
6. Указ Президента РФ от 25.11.2017 N 569 "О внесении изменений в Положение о Федеральной службе по техническому и экспортному контролю, утвержденное Указом Президента Российской Федерации от 16 августа 2004 г. N 1085.
7. NIST Special Publication 800-82 // Guide to Industrial Control Systems (ICS) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/SpecialPublications/NIST.SP.800-82r1.pdf>
8. Солнышкина И.В. Теория систем массового обслуживания: учеб. пособие / И.В. Солнышкина. – Комсомольск-на-Амуре :ФГБОУ ВПО «КнАГТУ», 2015. -76 с.
9. Теория массового обслуживания. Методические указания, учебная программа и задания для контрольных работ № 1, 2 для студентов заочной формы обучения специальности 071900 «Информационные системы в технике и технологиях». - Самара: СамГАПС, 2002.- 38с.
10. Лычкина Н.Н. Имитационное моделирование экономических процессов / Учебное пособие. — М.: Инфра-М, 2012. — 253 С.
11. Моделирование систем: учебное пособие / сост. Р. Г. Асулдаев. – Белгород, 2016. – 236 с.
12. Имитационное моделирование: учебное пособие/ Ю.А. Кораблев. Москва : КНОРУС, 2017. — 146 с.
13. Воеводин В.А., Черняев В.С. и Буренок Д.С. О применении имитационной модели для оценки вероятности отказа сервера в контексте DDoS-атак//Материалы 76-й Всероссийской конференции «Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий», 2021, с. 390-393.
14. Lee J L and Hong C S 2013 Nonparametric Detection Methods against DDoS Attack Korean Journal of Applied Statistics vol 4 pp. 291-305.
15. Leian Chen, Xiaodong Wang 2020 Quickest attack detection in smart grid based on sequential Monte Carlo filtering» IET Smart Grid vol 3 pp. 686 – 696.

16. Мицель А.А., Грибанова Е.Б. Имитационное моделирование экономических процессов в Excel Томск: Изд-во ТУСУР, 2019. –115 с [Электронный ресурс].Режим доступа: <https://asu.tusur.ru/learning/090303/d24/090303-d24-lect2.pdf>
17. Воеводин В.А., Буренок Д.С. и Черняев В.С. 2021 Программа для оценки защищенности сервера от DDoS-атак Свидетельство об официальной регистрации компьютерной программы № 2021615403.

References:

1. Analysis of existing automated process control systems [Electronic resource]. Access mode: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-suschestvuyuschih-avtomatizirovannyh-sistem-upravleniya-tehnologicheskimi-protsessami/viewer>
2. The threat of DDoS attacks and ambiguous attitude to them [Electronic resource]. Access mode: <https://www.kaspersky.ru/blog/ugroza-ddos-atak-i-neodnoznachnoe-k-nim-otnoshenie/3236/>
3. Federal Law No. 152-FZ of 27.07.2006 "On personal data" // SPS ConsultantPlus.
4. Resolution of the Government of the Russian Federation of November 1, 2012 N 1119 Moscow "On approval of requirements for the protection of personal data during their processing in personal data information systems"
5. Government Resolution No. 162 of 17.02.2018 "On approval of the Rules for the Implementation of state Control in the Field of ensuring the security of Significant objects of critical information infrastructure of the Russian Federation"
6. Decree of the President of the Russian Federation of 25.11.2017 N 569 "On Amendments to the Regulations on the Federal Service for Technical and Export Control, approved by Decree of the President of the Russian Federation of August 16, 2004; 1085
7. NIST Special Publication 800-82. Guide to Industrial Control Systems (ICS) [Electronic resource]. Access mode: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/SpecialPublications/NIST.SP.800-82r1.pdf>
8. Solnyshkina I.V. Theory of queuing systems: textbook. Manual. Komsomolsk-on-Amur : FGBOU VPO "KnAGTU", 2015;76.[In Russ]
9. Queuing theory. Methodical instructions, curriculum and tasks for control works No. 1, 2 for correspondence students of the specialty 071900 "Information systems in engineering and technology". Samara: SamGAPS, 2002; 38.[In Russ]
10. Lychkina N.N. Simulation modeling of economic processes. Textbook. M.: Infra-M, 2012;253.[In Russ]
11. Modeling of systems: a textbook. comp. R. G. Asuldaev. Belgorod, 2016; 236. [In Russ]
12. Simulation modeling: textbook .Yu.A. Korablev. Moscow : KNORUS, 2017;146.[In Russ]
13. Voevodin V. A., Chernyaev V. S., Burenok D.S. On the use of a simulation model to assess the probability of server failure in the context of DDoS attacks // Proceedings of the 76th All-Russian Conference "Radioelectronic Devices and Systems for Infocommunication Technologies", 2021; 390-393. [In Russ]
14. Lee J L and Hong C S Nonparametric Detection Methods against DDoS Attack *Korean Journal of Applied Statistics* 2013; 4: 291-305.
15. Leian Chen, Xiaodong Wang. Quickest attack detection in smart grid based on sequential Monte Carlo filtering» *IET Smart Grid* 2020; 3: 686 – 696.
16. Micel` A.A., Griбанова Е.Б., Simulation of economic processes in Excel Tomsk: TUSUR Publishing House, 2019;115 [El.res.]. Access mode:<https://asu.tusur.ru/learning/090303/d24/090303-d24-lect2.pdf>
17. Voevodin V.A., Burenok D.S. i Chernyaev V.S. 2021 Program for evaluating server security from DDoS attacks Certificate of official registration of a computer program No. 2021615403.

Сведения об авторах:

Воеводин Владислав Александрович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры информационной безопасности; vva541@mail.ru

Черняев Валентин Сергеевич, магистрант; sergeich1997@yandex.ru

Буренок Дмитрий Сергеевич, магистрант; corr.dmitry@yahoo.com

Виноградов Иван Вадимович, студент; ivanvinogradov1111@gmail.com

Information about authors:

Vladislav A. Voevodin, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Assoc. Prof., Department of Information Security; vva541@mail.ru

Valentin S. Chernyaev, Master's student; sergeich1997@yandex.ru

Dmitry S. Burenok, Master's student; corr.dmitry@yahoo.com

Ivan V. Vinogradov, Student; ivanvinogradov1111@gmail.com

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 18.01.2023.

Одобрена после рецензирования/ Revised 22.02.2023.

Принята в печать/Accepted for publication 22.02.2023.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 528.721.221.6

DOI: 10.21822/2073-6185-2023-50-1-75-80

Обзорная статья / Review article

**Применение существующих алгоритмов по классификации
и кластеризации точек лазерного отражения (k-Means, DBSCAN, SVM)
для решения задач территориального планирования**

Д.А. Гура, О.С. Болтовнина

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

Резюме. Цель. Целью исследования является обобщение опыта применения и раскрытие особенностей методов классификации и кластеризации изображений, полученных путем лазерного сканирования. **Метод.** Исследование основано на применении алгоритмов распознавания, кластеризации и классификации данных. **Результат.** Проведен краткий обзор имеющихся алгоритмов, используемых для кластеризации изображений, полученных путем лазерного сканирования. Показана возможность использования последовательно алгоритмов K-means и DBSCAN для осуществления кластеризации в отношении объектов различной формы. Проанализированы возможности использования алгоритмов по классификации и кластеризации точек лазерного отражения (k-Means, DBSCAN, SVM) в рамках решения задач территориального планирования. **Вывод.** Применение представленных алгоритмов позволяет сформировать массивы данных, которые при наложении друг на друга позволяют получить еще более точные отображения объектов и территорий в документах территориального планирования, а в перспективе на основе применения методов машинного обучения и обработки матриц данных, имеющихся в памяти, получать более точные сведения об объектах на местности.

Ключевые слова: территориальное планирование, K-means, DBSCAN кластеризация, классификация, облако точек, лазерное сканирование

Для цитирования: Д.А. Гура, О.С. Болтовнина. Применение существующих алгоритмов по классификации и кластеризации точек лазерного отражения (k-Means, DBSCAN, SVM) для решения задач территориального планирования. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023; 50(1):75-80. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-1-75-80

Application of existing algorithms for classification and clustering of laser reflection points (k-Means, DBSCAN, SVM) to solve territorial planning problems

D.A. Gura, O.S. Boltovnina

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

Abstract. Objective. The aim of the study is to generalize the experience of using and reveal the features of methods for classifying and clustering images obtained by laser scanning. **Method.** The study is based on the use of algorithms for recognition, clustering and classification of data obtained using laser scanning. **Result.** A brief review of existing algorithms used for clustering images obtained by laser scanning has been carried out. The possibility of using sequentially the K-means and DBSCAN algorithms for clustering in relation to objects of various shapes is shown. The possibilities of using algorithms for the classification and clustering of laser reflection points (k-Means, DBSCAN, SVM) in the framework of solving territorial planning problems are analyzed. **Conclusion.** The use of the presented algorithms makes it possible to form data arrays that, when superimposed on each other subsequently and further processed, make it possible to obtain even more accurate representations of objects and territories in territo-

rial planning documents, and in the future, based on the use of machine learning methods and processing of data matrices available in memory, get more accurate information about objects on the ground.

Keywords: territorial planning, K-means, DBSCAN clustering, classification, point cloud, laser scanning

For citation: D.A. Gura, O.S. Boltovnina. Application of existing algorithms for classification and clustering of laser reflection points (k-Means, DBSCAN, SVM) to solve territorial planning problems. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science. 2023; 50 (1): 75-80. DOI: 10.21822 /2073-6185-2023-50-1-75-80

Введение. Распознавание пространственных данных в автоматическом режиме на современном этапе используется во многих областях деятельности. В рамках территориального планирования, формирования правил землепользования и застройки, планирования размещения территориальных зон различного типа распознавание пространственных данных, в первую очередь, полученных при помощи лазерного сканирования съемок земной поверхности и подземных сооружений, позволяет сформировать общий план развития территории, наличия на ней объектов капитального строительства, некапитальных объектов, линейных объектов, в том числе, с учетом их технического состояния.

В то же время, в современных условиях большое значение имеет максимальная точность распознавания объектов, которые имеют различную форму. Методы лазерного сканирования, и в особенности распознавания его результатов на основе распознавания точек, могут существенно отличаться, а их выбор требует индивидуального подхода, исходя из поставленных задач. Эффективность решения этих задач определяется тем, насколько адекватно подобраны методы распознавания изображений в рамках обработки полученных данных лазерного сканирования.

В рамках территориального планирования это особенно актуально, поскольку различные территориальные зоны (например, водоохранные зоны, зоны объектов газопровода и др.), а также территории с разным видом грунтов (болота, пески и др.) могут иметь достаточно различную форму. Это относится и к объектам капитального строительства, например, жилым домам. В соответствующих условиях особенно актуально применение алгоритмов распознавания, классификации и кластеризации изображений, полученных средствами лазерного сканирования – лазерных облаков точек.

Алгоритмы кластеризации пространственных данных различаются по степени точности и функционалу. Так, метод опорных векторов (Support Vector Machines, SVM) является линейным алгоритмом, принцип работы которого – создавать линию или плоскость, разделяющую данные на классы. Данный алгоритм имеет весьма широкое применение на практике. В рамках территориального планирования показана эффективность его использования в рамках оценки технического состояния и соответственно планирования размещения, реконструкции и капитального ремонта линейных объектов – асфальтовых и железных дорог, мостов, трубопроводов, теплотрасс.

Более широким функционалом и сложной системой работы обладает алгоритм DBSCAN, который представляет собой плотностный алгоритм, позволяющий осуществлять кластеризацию пространственных данных при наличии фоновых точек («шума») [2]. Особенность алгоритма DBSCAN в том, что он позволяет разбивать облако точек на кластеры произвольной формы. Большинство иных алгоритмов создают кластеры сферической формы, так как минимизируют расстояние от точки до центра создаваемого кластера. В то время как при использовании алгоритма DBSCAN существует возможность распознавать кластеры разной формы.

K-means также позволяет распознавать и формировать кластеры разной формы, однако он имеет значительно более низкую вычислительную сложность, то есть позволяет наметить общие контуры кластеров без достаточной детализации распознаваемых объектов. Это достаточно актуально в рамках территориального планирования, поскольку несо-

ответствие реальной ситуации на местности (наличие зон с особыми условиями использования территорий, зон, для которых не разрабатываются градостроительные регламенты, опасных зон и др.) и сведений, содержащихся в кадастровом деле, повлекло проблемы в области регистрации недвижимости, которая была признана самовольной постройкой.

В кадастровое дело в обязательном порядке вносятся и сведения об ограничении оборотоспособности земельных участков и ограничении прав собственника, так как эти сведения впоследствии содержатся в кадастровом паспорте, градостроительном плане земельного участка и выписке из ЕГРН, предоставляемых заинтересованным лицам. В тех случаях, когда государство вводит ограничения прав собственника на его земельный участок, эти ограничения вносят в Единый государственный реестр прав на недвижимое имущество и сделок с ним. После регистрации ограничения права на тот или иной земельный участок, оно принадлежит данной территории, и при отчуждении земельного участка, продаже или дарении остается действующим для данной земли. Некорректное отображение объектов в документах территориального планирования может повлечь неправомерное ограничение прав собственников и землепользователей.

Постановка задачи. Согласно ч. 2 ст. 57.3 ГрК РФ, источниками информации для составления градостроительного плана земельного участка, который является основной «картографической» частью кадастрового дела, выступают основные сведения из ЕГРН, сведения, содержащиеся в Генеральном плане соответствующей территории и правилах землепользования и застройки. Вопросы территориального планирования, в первую очередь, возникают в рамках общих проблем ведения земельного кадастра. В первую очередь, это проблема недостаточно полных сведений в земельном кадастре, ведение которого начато только в 2001 году. Первые сведения, внесенные в кадастр, описывали земельные участки и их границы достаточно некорректно.

Это обуславливает актуальность использования алгоритмов кластеризации данных, полученных при лазерном сканировании земной поверхности и объектов. В этом отношении актуально применение нескольких алгоритмов одновременно.

Методы исследования. Трехмерное лазерное сканирование, результаты которого распознаются с использованием методов глубинного машинного обучения, позволяет более детально отображать те объекты, которые представлены на лазерных снимках в виде облаков точек (геометрических мест точек), поскольку использование вектора распознавания, а равно и его учет дает более точное представление о форме, размерах, плотности отображаемого предмета [14]. Однако соответствующие возможности лазерного сканирования в значительной степени зависят от применяемых методов обработки, полученных с его помощью изображений. В связи с этим, сегодня большое значение на практике придается разработке алгоритмов классификации и кластеризации объектов, полученных при лазерном сканировании.

K-means и DBSCAN позволяют эффективно осуществить кластеризацию в отношении объектов различной формы – не только сферической, но и линейной, а также объектов неправильной формы, что обуславливает актуальность их использования при распознавании данных снимков земной поверхности, необходимых для формирования и корректировки документов территориального планирования. Алгоритм K-means менее точен в части отображения данных, чем DBSCAN, в связи с чем, первый актуально применять в рамках распознавания данных имеющих круглую сферическую форму. K-means позволяет работать с большим числом данных, что позволяет в целом определить наличие будущих кластеров, их местоположение, расстояние между ними. В рамках территориального планирования это предполагает возможность наметить общие особенности расположения объектов на местности, сформировать общее представление об объектах территориального планирования, но не детализировать их. Это требует применения дополнительных алгоритмов для большей детализации изображений.

Рассмотрим пример использования алгоритмов DBSCAN и K-means для распознавания объектов различной формы. По рис. 1 можно отметить, что второй набор данных

имеет более сложную форму, чем первый. DBSCAN работает значительно медленнее, чем K-means и не позволяет обрабатывать большое число данных. В связи с этим, для ускорения кластеризации актуально применять алгоритм DBSCAN после применения K-means к распознанным предварительно данным, на основе которых сформированы кластеры.

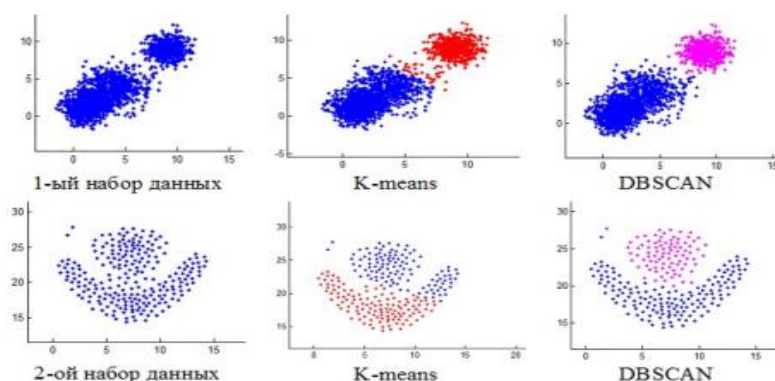


Рис. 1. Применение алгоритмов DBSCAN и K-means для распознавания объектов различной формы

Fig.1. Application of DBSCAN and K-means algorithms for recognition of objects of various shapes

Обсуждение результатов. K-means, таким образом, применяется для разбивки большого массива данных на отдельные кластеры, а алгоритм DBSCAN позволяет детализировать их форму и размеры. Это обуславливает актуальность применения нескольких алгоритмов в определенной последовательности для решения задач территориального планирования. В целом, применение в рамках территориального планирования различных алгоритмов распознавания, кластеризации и классификации данных, полученных при использовании лазерного сканирования требует индивидуального подхода к выбору алгоритмов, исходя из тех задач, которые поставлены. Так, например, идентификация, поиск повреждений на линейных объектах х железных дорогах, асфальтовых дорогах, предполагает сравнительно простые способы кластеризации, что позволяет использовать наиболее простой и быстрый в работе алгоритм SVM. Применение алгоритмов DBSCAN и K-means может быть применимо в рамках территориального планирования для решения более сложных задач – например, идентификации видов грунтов, как основы для будущих инженерных изысканий и планирования строительства, а также для поиска незарегистрированных капитальных сооружений. Такие задачи более сложны в части решения, и решение их, при применении вышеописанных алгоритмов, предполагает значительные временные затраты, которые можно минимизировать, последовательно используя алгоритмы с низкой и высокой вычислительной точностью.

Вывод. В целом, использование DBSCAN и K-means позволяет более эффективно отображать объекты на местности на планово-картографических материалах, в том числе, с учетом технического состояния, поломок и иных проблем таких объектов.

Применение различных алгоритмов распознавания, кластеризации и классификации данных, полученных при использовании лазерного сканирования, позволяет также сформировать определенные массивы данных, которые при наложении их друг на друга впоследствии и дальнейшей обработке позволяют получить еще более точные отображения объектов и территорий в документах территориального планирования.

Перспективным направлениям в этой связи будет и применение методов машинного обучения, глубокого машинного обучения, которые, на основе обработки матриц данных, имеющих в памяти, а также фиксации алгоритмов обработки таких данных, в дальнейшем дают возможность получать более точные сведения об объектах на местности.

Таким образом, в рамках работы показана эффективность применения различных алгоритмов распознавания, кластеризации и классификации данных, полученных при использовании лазерного сканирования, в рамках осуществления территориального планирования.

Библиографический список:

1. Градостроительный кодекс Российской Федерации от 29.12.2004 N 190-ФЗ (ред. от 30.12.2021)(с изм. и доп., вступ. в силу с 01.01.2022)//База Консультант. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_51040/fe0cad704c69e3b97bf615f0437ecf1996a5767
2. Богданов А.Н., Алешутин И.А. Наземное лазерное сканирование в строительстве и BIM-технологиях//Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета, №. 4 (46), 2018, С. 326-332.
3. Горохов Д.А., Ожигин Д.С., Ожигина С.Б., Дорош Н.А., Кулыгин Д.А., Воробьева Ю.Б. Инструментальные наблюдения за деформациями техногенных объектов // Интерэкспо Гео-Сибирь, Т. 1, №. 1, 2017, С. 135-139.
4. Каркищенко А.Н. Левашев С.П. Метод распознавания объектов по данным лазерного сканирования на основе спектральной теории графов//Известия ЮФУ. Технические науки. 2019. №3 (205). С. 72-85.
5. Киямов И.К., Мингазов Р.Х., Музафаров А.Ф., Ибрагимов Р.А., Сибгатуллин А.А. Технология лазерного сканирования в 3D проектировании // Экспозиция Нефть Газ, №. 7 (32), 2013, С. 41-43.
6. Ковач Н.С. Картографирование линейных инженерных объектов по данным лазерного сканирования // Вестник Московского университета. Серия 5. География, №. 1, 2013, С. 47-54.
7. Кошан Е.К. Возможности, преимущества и недостатки наземного лазерного сканирования // Интерэкспо Гео-Сибирь, Т. 9, №. 1, 2017, С. 27-30.
8. Ленченкова Е.П. Моделирование трассы железнодорожного пути по результатам мобильного лазерного сканирования//Известия Петербургского университета путей сообщения, Т. 15, №. 3, 2018, С. 408-413.
9. Левашев С.П. Распознавание 3D объектов на основе спектральных инвариантов с использованием глубокого машинного обучения//Известия Южного федерального университета. Технические науки, 2019, №. 3 (205), С. 20-31.
10. Пантюхин Д.В., Нгуен Данг Тао, Ву Вьет Тханг Применение нейронной сети типа многослойный персептрон для распознавания типа атаки на информационную систему на примере базы KDD'99. XI Всероссийская научная конференция «Нейрокомпьютеры и их применение», 17 Марта 2015, МГППУ.
11. Середович В.А., Иванов А.В., Середович А.В., Горохова Е.И., Бородулина И.В., Романович Е.В. Применение наземного лазерного сканирования для контроля строительства и капитального ремонта автомобильных дорог // Интерэкспо Гео-Сибирь, Т. 1, №. 3, 2010, С. 69-72.
12. Середович В.А., Алтынцев М.А., Егоров А.К. Определение индекса ровности дорожного покрытия по данным мобильного лазерного сканирования // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий), Т. 22, №. 3, 2017, С. 33-44.
13. Созыкин А.В. Обзор методов обучения глубоких нейронных сетей // Вестник ЮУрГУ. Серия: Вычислительная математика и информатика. 2017. №3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-metodov-obucheniya-glubokih-nejronnyh-setey> (дата обращения: 13.12.2022).
14. Холодов П. Н., Титов К. М., Подвербный В. А. Моделирование плана оси железнодорожного пути и его изменения в процессе эксплуатации // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование, №. 1 (61), 2019, С. 74-81.
15. Шоломицкий А.А., Лагутина Е.К., Соболева Е.Л. Применение лазерного сканирования для мониторинга большепролетных сооружений // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий), Т. 23, №. 2, 2018, С. 43-57.
16. Шокина М.О. Применение алгоритма k-means++ для кластеризации последовательностей с неизвестным количеством кластеров // Новые информационные технологии в автоматизированных системах, №. 20, 2017, С. 160-163.
17. Cho M., Alahari K., Ponce J. Learning graphs to match, in IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), 2013, pp. 25-32.
18. Chavel I. Riemannian Geometry: A Modern Introduction // Cambridge University Press, Cambridge, 2006. – Vol. 98. – P. 471.
19. Krizhevsky A., Sutskever I., Hinton G.E. ImageNet classification with deep convolutional neural networks // NIPS'12 Proceedings of the 25th International Conference on Neural Information Processing Systems. – Lake Tahoe, USA, 2012. – P. 1097-1105.
20. Macrini D., Siddiqi K., Dickinson S. From Skeletons to Bone Graphs: Medial Abstraction for Object Recognition // 26th IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR. – Anchorage, Alaska, USA, 2008. – P. 1-8

References:

1. Town Planning Code of the Russian Federation of December 29, 2004 N 190-FZ (as amended on December 30, 2021)(as amended and supplemented, effective from January 1, 2022). Consultant. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_51040/fe0cad704c69e3b97bf615f0437ecf1996a5767

2. Bogdanov A.N., Aleshutin I.A. Terrestrial laser scanning in construction and vim-technologies. *Proceedings of the Kazan State University of Architecture and Civil Engineering*, 2018; 4 (46): 326-332.[In Russ]
3. D. A. Gorokhov, D. S. Ozhigin, S. B. Ozhigina, N. A. Dorosh, D. A. Kulygin, and Yu. Instrumental observations of the deformations of technogenic objects. *Interexpo Geo-Siberia*, 2017; 1(1): 135-139. [In Russ]
4. Karkishchenko A.N. Levashev S.P. Object recognition method based on laser scanning data based on spectral graph theory. *Izvestiya SFedU. Technical science*. 2019; 3 (205): 72-85.[In Russ]
5. Kiyamov I.K., Mingazov R.Kh., Muzafarov A.F., Ibragimov R.A., Sibgatullin A.A. Laser scanning technology in 3D design. *Oil and Gas Exposition*, 2013; 7 (32): 41-43 .[In Russ]
6. Kovach N.S. Mapping of linear engineering objects according to laser scanning data. *Bulletin of Moscow University. Series 5. Geography*, 2013; 1: 47-54.[In Russ]
7. Koshan E.K. Possibilities, advantages and disadvantages of terrestrial laser scanning. *Interexpo Geo-Siberia*, 2017; 9(1): 27-30.[In Russ]
8. Lenchenkova E.P. Modeling the route of the railway track based on the results of mobile laser scanning. *Bulletin of the Petersburg University of Railway Transport*, 2018; 15(3): 408-413.[In Russ]
9. Levashev S.P. Recognition of 3D objects based on spectral invariants using deep machine learning. *Bulletin of the Southern Federal University. Technical sciences*, 2019; 3 (205): 20-31.[In Russ]
10. Pantyukhin D.V., Nguyen Dang Tao, Vu Viet Thang Application of a neural network of the multilayer perceptron type for recognizing the type of attack on an information system on the example of the KDD'99 base. XI All-Russian Scientific Conference "Neurocomputers and their applications", March 17, 2015 , MSUPU.[In Russ]
11. Seredovich V.A., Ivanov A.V., Seredovich A.V., Gorokhova E.I., Borodulina I.V., Romanovich E.V. Application of terrestrial laser scanning to control the construction and overhaul of highways. *Interexpo Geo-Siberia*, 2010; 1(3): 69-72.[In Russ]
12. Seredovich V.A., Altyntsev M.A., Egorov A.K. Determination of the evenness index of the road surface according to mobile laser scanning data. *Vestnik SSUGiT (Siberian State University of Geosystems and Technologies)*, 2017; 22(3): 33-44.[In Russ]
13. Sozykin A.V. Overview of learning methods for deep neural networks. *Bulletin of SUSU. Series: Numerical Mathematics and Informatics*. 2017. №3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-metodov-obucheniya-glubokih-neyronnyh-setey> (date of access: 12/13/2022)[In Russ]
14. Kholodov P. N., Titov K. M., Podverbny V. A. Modeling the plan of the axis of the railway track and its changes during operation. *Sovremennye tekhnologii. System analysis. Modeling*, 2019;1(61):74-81[In Russ]
15. Sholomitsky A.A., Lagutina E.K., Soboleva E.L. Application of laser scanning for monitoring of large-span structures. *Bulletin of SGUGiT (Siberian State University of Geosystems and Technologies)*, 2018; 23(2): 43-57[In Russ]
16. Shokina M.O. Application of the k-means++ algorithm for clustering sequences with an unknown number of clusters. *New information technologies in automated systems*, 2017; 20: 160-163.[In Russ]
17. Cho M., Alahari K., Ponce J. Learning graphs to match, in IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), 2013; 25-32.
18. Chavel I. Riemannian Geometry: A Modern Introduction. *Cambridge University Press, Cambridge*, 2006; 98: 471.
19. Krizhevsky A., Sutskever I., Hinton G.E. ImageNet classification with deep convolutional neural networks. NIPS'12 Proceedings of the 25th International Conference on Neural Information Processing Systems. Lake Tahoe, USA, 2012; 1097-1105.
20. Macrini D., Siddiqi K., Dickinson S. From Skeletons to Bone Graphs: Medial Abstraction for Object Recognition. 26th IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR. Anchorage, Alaska, USA, 2008; 1-8

Сведения об авторах:

Ольга Сергеевна Болтовнина, студент, кафедра кадастра и геоинженерии, barilchenko00@mail.ru
Дмитрий Андреевич Гура, кандидат технических наук, доцент, кафедра кадастра и геоинженерии; gda-kuban@mail.ru

Information about authors:

Olga S. Boltovnnina, Student, Department of Cadastre and Geoengineering; barilchenko00@mail.ru
Dmitry A. Gura, Cand. Sci. (Eng), Assoc. Prof., Department of Cadastre and Geoengineering; gda-kuban@mail.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 04.02.2023.

Одобрена после рецензирования/ Revised 26.02.2023.

Принята в печать/Accepted for publication 26.02.2023.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 004.056

DOI: 10.21822/2073-6185-2023-50-1-81-88

Оригинальная статья /Original Paper

Анализ особенностей функционирования защищенных автоматизированных систем органов внутренних дел в условиях воздействия угроз несанкционированного доступа

А.О. Ефимов, В.С. Наседкина, А.Д. Попов, Е.А. Рогозин, В.Р. Романова

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

Резюме. Цель. Целью исследования является анализ особенностей функционирования защищенных автоматизированных систем и разработка структурной схемы типовой АС ОВД, включающей в свой состав различные структурные элементы. **Метод.** В качестве основополагающего метода проведения исследования является метод системного анализа. **Результат.** На основе разработанной типовой структурной схемы АС ОВД определены в соответствии с официальным сайтом ФСТЭК, угрозы к веб-серверам, а также, в соответствии с ними выявлены потенциальные уязвимости (слабые места с точки зрения информационной безопасности); разработана и приведена классификация всех потенциально опасных угроз к информационному ресурсу защищенных АС ОВД. **Вывод.** Материалы статьи могут быть использованы для проведения анализа и разработки методики количественной оценки рисков нарушения информационной безопасности web-серверов АС ОВД РФ; методики оценки уровня защищенности АС ОВД РФ; методики доступа штатных пользователей АС ОВД РФ к информационному ресурсу этих систем на основе семантического анализа.

Ключевые слова: угроза, атака, конфиденциальная информация, интернет, нарушитель, информационный ресурс, веб-сервер

Для цитирования: А.О. Ефимов, В.С. Наседкина, А.Д. Попов, Е.А. Рогозин, В.Р. Романова. Анализ особенностей функционирования защищенных автоматизированных систем органов внутренних дел в условиях воздействия угроз несанкционированного доступа. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023; 50(1):81-88. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-1-81-88

Analysis and features of the functioning of protected automated systems of internal affairs bodies under the influence of threats of unauthorized access

A.O. Efimov, V.S. Nasedkina, A.D. Popov, E.A. Rogozin, V.R. Romanova

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

Abstract. Objective. The purpose of the study is to analyze the features of the functioning of protected automated systems and develop a structural diagram of a typical ATS AS, which includes various structural elements. **Method.** As a fundamental method of conducting research is the method of system analysis. **Result.** Based on the developed typical structural diagram of the ATS AS, threats to web servers were identified in accordance with the official website of the FSTEC, and, in accordance with them, potential vulnerabilities (weak points in terms of information security) were identified; a classification of all potentially dangerous threats to the information resource of protected ATS automated systems was developed and presented. **Conclusion.** The materials of the article can be used to analyze and develop a methodology for quantitatively assessing the risks of information security violations of the web servers of the ATS of the Russian Federation; methods for assessing the level of security of the ATS of the Russian Federation; methods of access of regular users of the RF ATS AS to the information resource of these

systems based on semantic analysis.

Keywords: Threat, attack, confidential information, internet, intruder, information resource, web server

For citation: A.O. Efimov, V.S. Nasedkina, A.D. Popov, E.A. Rogozin, V.R. Romanova. Analysis features of the functioning of protected automated systems of internal affairs bodies under the influence of threats of unauthorized access. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science. 2023; 50(1): 81-88. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-1-81-88

Введение. Процесс автоматизации нашел широкое применение в органах внутренних дел РФ, компьютерные системы широко используются на всех уровнях от нижнего звена до наивысшего, включая управленческий аппарат. Как показывает опыт эксплуатации этих систем, основной особенностью которых является обработка, хранение и передача конфиденциальной информации, что требует своевременного принятия организационных и технических мер, связанных с защитой информации в этих системах (далее по тексту – АС ОВД), а также организацию обеспечения требуемого уровня безопасности информации (БИ) в целом.

Как показывает анализ [1-9], одним из самых опасных видов атак АС ОВД РФ, являются атаки, связанные с несанкционированным доступом (НСД) злоумышленника на информационный ресурс, что в целом может привести к нарушению надежности функционирования этих систем. Важность этой проблемы, в частности, подчеркивается в [5, 8].

Постановка задачи. В данной статье, в качестве примера, разработана обобщенная структурная схема АС ОВД РФ, включая веб-серверы (рис.1). Определены, в соответствии с требованиями действующей методической документации Федеральной службы по техническому и экспертному контролю (ФСТЭК) [7] основные угрозы НСД, представляющие опасность веб-серверам, также, в соответствии с ними определены основные уязвимости («слабые места с точки зрения ИБ») (рис.2), а также приведена и разработана классификационная схема угроз НСД с учетом веб-серверов (рис.3).

Методы исследования. Анализ открытых литературных источников [1-9] позволил разработать структурную схему типовой АС ОВД РФ, представленной на рис.1, где одним из основных компонентов этой системы является веб-сервер.

Веб-сервер – это совокупность аппаратного и программного обеспечения, решающая ряд задач, основной задачей которой, является предоставление пользователю результатов запроса после его обработки. Веб-серверы не только выдают информацию по запросу, но и могут выполнять более сложные операции по её обработке. На выходе веб-сервера информация пользователю выдается в формате «*.html», поэтому защита веб-сервера от компьютерных атак, связанных с НСД, является весьма актуальной задачей.

Уязвимость веб-сервера – это свойство веб-сервера, предоставляющее возможность реализации угроз безопасности обрабатываемой в ней информации [1, с.147].

Защита информации направлена на предупреждение возможности возникновения, предотвращение реализации или снижение ущерба от последствий несанкционированных действий в результате реализации той или иной угрозы безопасности информации.

Введение термина «угроза безопасности информации» позволяет объединить одним понятием все возможные негативные условия и факторы, влияющие прямым образом на безопасность информации, то есть на ее целостность, доступность или конфиденциальность [1, с.147]. Под угрозой безопасности информации понимается совокупность условий и факторов, создающих потенциальную или реально существующую опасность нарушения безопасности информации [1, с.147].

Под источником угрозы безопасности информации понимается субъект (физическое лицо, материальный объект или физическое явление), являющийся непосредственной причиной возникновения угрозы безопасности информации. [1, с.151].

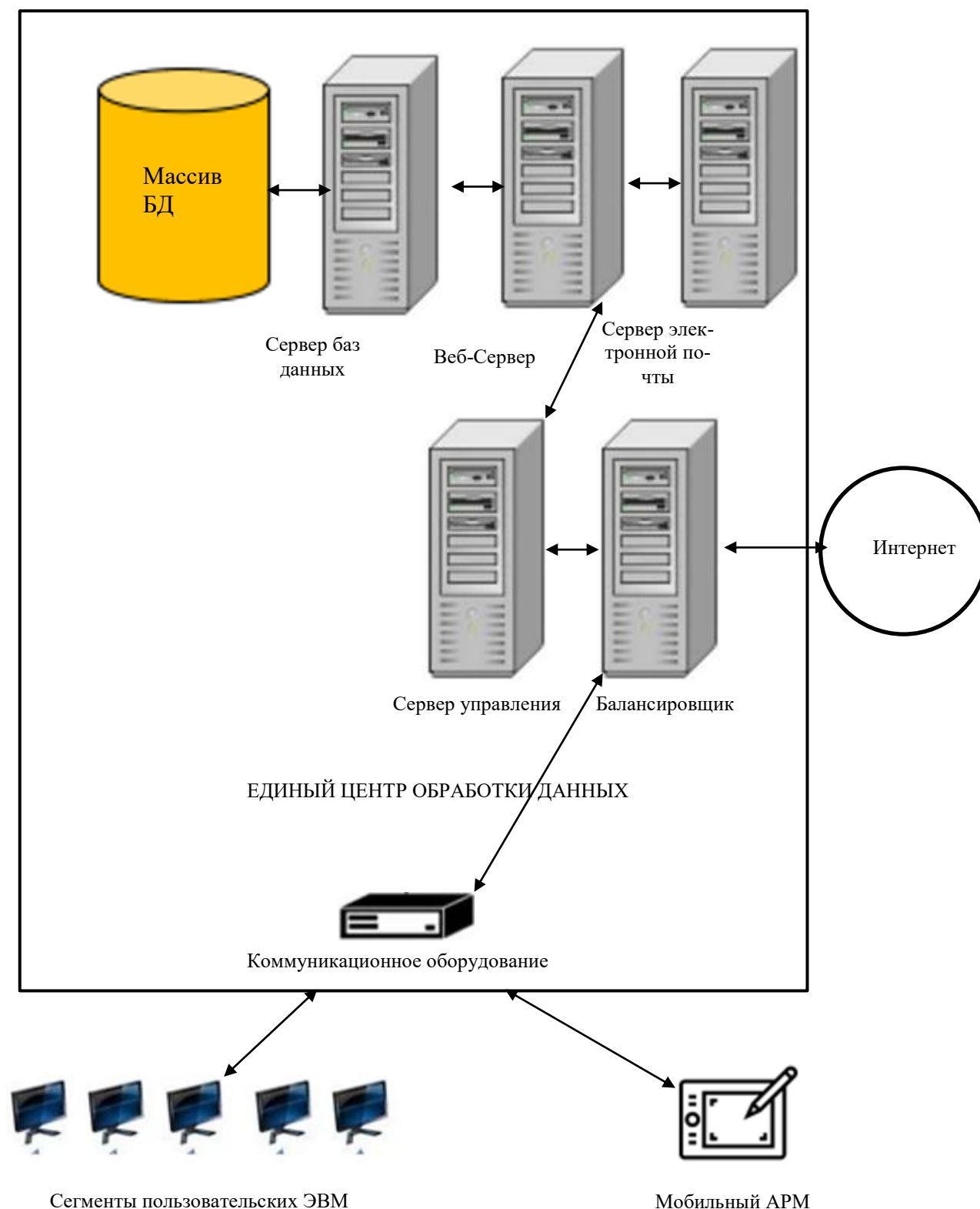


Рис.1. Типовая структура АС ОВД
Fig. 1. Typical structure of ATS AS

Внешний источник угрозы БИ – это субъект (физическое лицо, организация, служба иностранного государства и т.п.), который способен извне по отношению к АС ОВД РФ создать обстоятельства, при которых функционирование системы может оказаться под угрозой. Внутренний источник угрозы БИ – это субъект в пределах территории организации, деятельность которого, преднамеренно или непреднамеренно может привести к нарушению БИ, циркулирующей в АС ОВД РФ.

Указанными субъектами могут быть: нарушитель, программная или программно-аппаратная закладка, носитель с установленной на нем вредоносной или иной программой, используемой для реализации угрозы безопасности информации в ИС [1, с.151].

Из-за различных уязвимостей, которыми могут обладать веб-сервера, в соответствии с требованиями действующей методической документации Федеральной службы по техническому и экспертному контролю (ФСТЭК) были проанализированы угрозы, способствующие нанести ущерб веб-серверам (рис. 2).

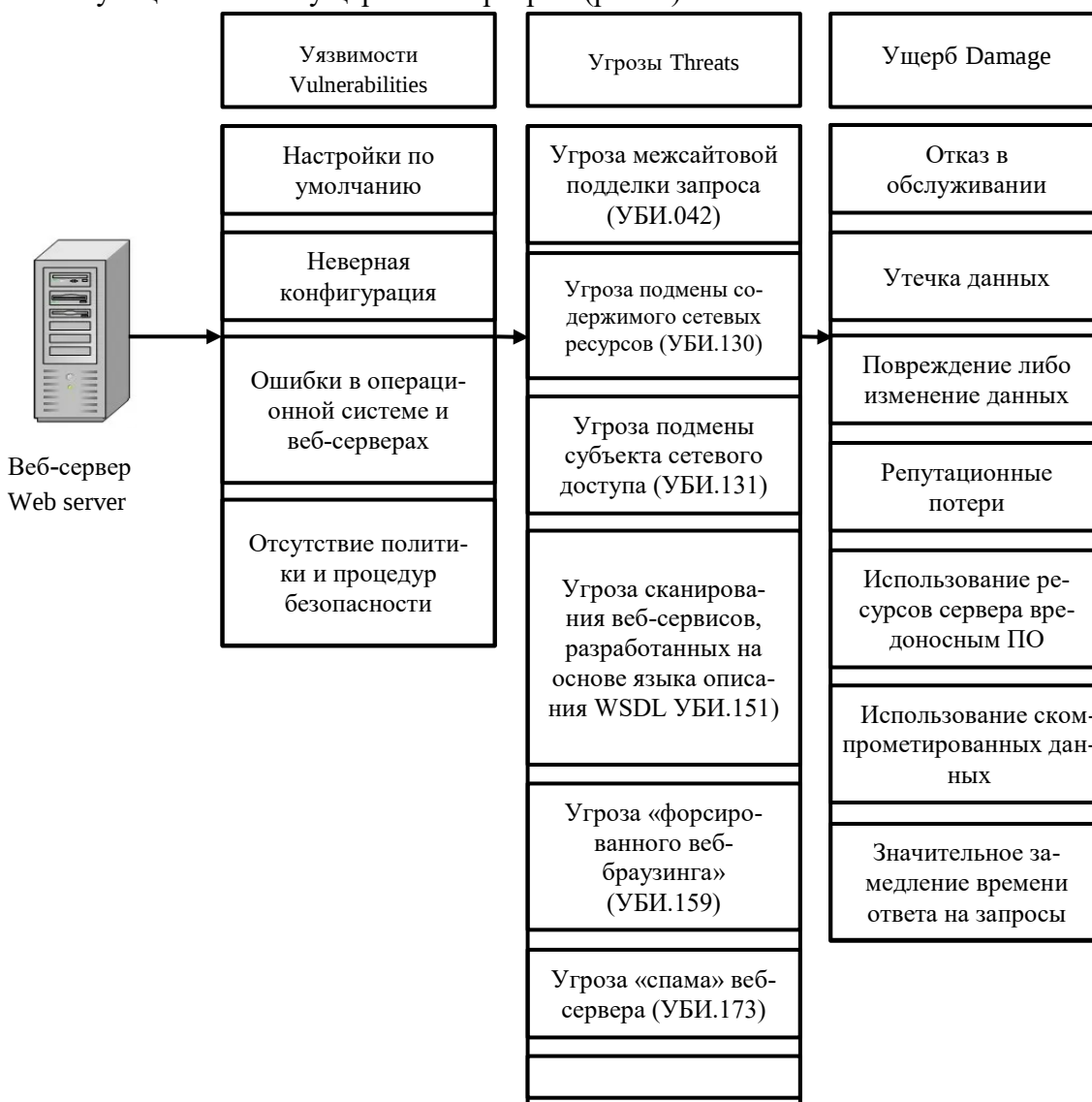


Рис. 2. Угрозы, способствующие нанести ущерб веб-серверам

Fig. 2. Threats that help damage web servers

Угрозы, представляющие опасность веб-серверам АС ОВД РФ, с точки зрения их ИБ приведены в таб. 1. Источником угроз могут являться внешние нарушители с низким или средним потенциалом. К последствиям реализации угрозы можно отнести нарушение конфиденциальности, целостности, доступности [3], что в целом ведет к нарушению работоспособности АС ОВД РФ.

Таблица 1. Актуальные угрозы внешнего нарушителя БИ к информационному ресурсу веб-серверов локализованных в АС ОВД РФ
Table 1. Actual threats from an external BI violator to the information resource of web servers localized in the ATS of the Russian Federation

№	Наименование угрозы Name of the threat	Описание угрозы Description of the threat	Объект воздействия Object of influence
УБИ.042	Угроза межсайтовой подделки запроса Threat of cross-site request forgery	Угроза заключается в возможности отправки нарушителем дискредитируемому пользователю ссылки на содержащий вредоносный код веб-ресурс, при переходе на который автоматически будут выполнены неправомерные вредоносные действия от имени дискредитированного пользователя.	Сетевой узел, сетевое программное обеспечение
УБИ.130	Угроза подмены содержимого сетевых ресурсов The threat of spoofing the contents of network resources	Угроза заключается в возможности осуществления нарушителем несанкционированного доступа к защищаемым данным пользователей сети или проведения различных мошеннических действий путём скрытной подмены содержимого хранящихся или передаваемых по сети данных.	Прикладное программное обеспечение, сетевое программное обеспечение, сетевой трафик
УБИ.131	Угроза подмены субъекта сетевого доступа Threat of substitution of the subject of network access	Заключается в возможности осуществления нарушителем несанкционированного доступа к защищаемым данным пользователей сети или проведения различных мошеннических действий путём скрытной подмены в отправляемых дискредитируемым пользователем сетевых запросах сведений об отправителе сообщения.	Прикладное программное обеспечение, сетевое программное обеспечение, сетевой трафик
УБИ.151	Угроза сканирования веб-сервисов, разработанных на основе языка описания WSDL The threat of scanning web services developed based on the WSDL description language	Угроза заключается в возможности получения нарушителем сведений о текущей конфигурации веб-служб и наличии в ней уязвимостей путём исследования WSDL-интерфейса веб-сервера.	Сетевое программное обеспечение, сетевой узел
УБИ.159	Угроза «форсированного веб-браузинга» The Threat of "Forced Web Browsing"	Заключается в возможности получения нарушителем доступа к защищаемой информации, выполнения привилегированных операций или осуществления иных деструктивных воздействий на некорректно защищённые компоненты веб-приложений.	Сетевой узел, сетевое программное обеспечение
УБИ.173	Угроза «спама» веб-сервера Web Server Spam Threat	Угроза заключается в возможности неправомерного осуществления нарушителем массовой рассылки коммерческих, политических, мошеннических и иных сообщений на веб-сервер без запроса со стороны дискредитируемых веб-серверов.	Сетевое программное обеспечение

Основные уязвимости веб-серверов АС ОВД с точки зрения ИБ:

1. Настройки по умолчанию подразумевают под собой, что никаких изменений в работу программ не вносится, и они функционируют в соответствии с начальными алгоритмами.
2. Неверная конфигурация с точки зрения ИБ означает, что данный вид уязвимости относится к неверной реализации политики безопасности, предназначенной для качественной защиты данных, имеющиеся в приложениях.
3. Ошибки в операционной системе и веб-серверах демонстрируют, что в ОС имеется уязвимость типа «дыра», через которую можно получить доступ к информационному ресурсу АС ОВД РФ, что ведет к нарушению конфиденциальности, целостности, защищенности и доступности этих систем.

4. Отсутствие политики и процедур безопасности означает, что данная уязвимость ведет к нарушению защищенности АС ОВД в целом [2,4,6].

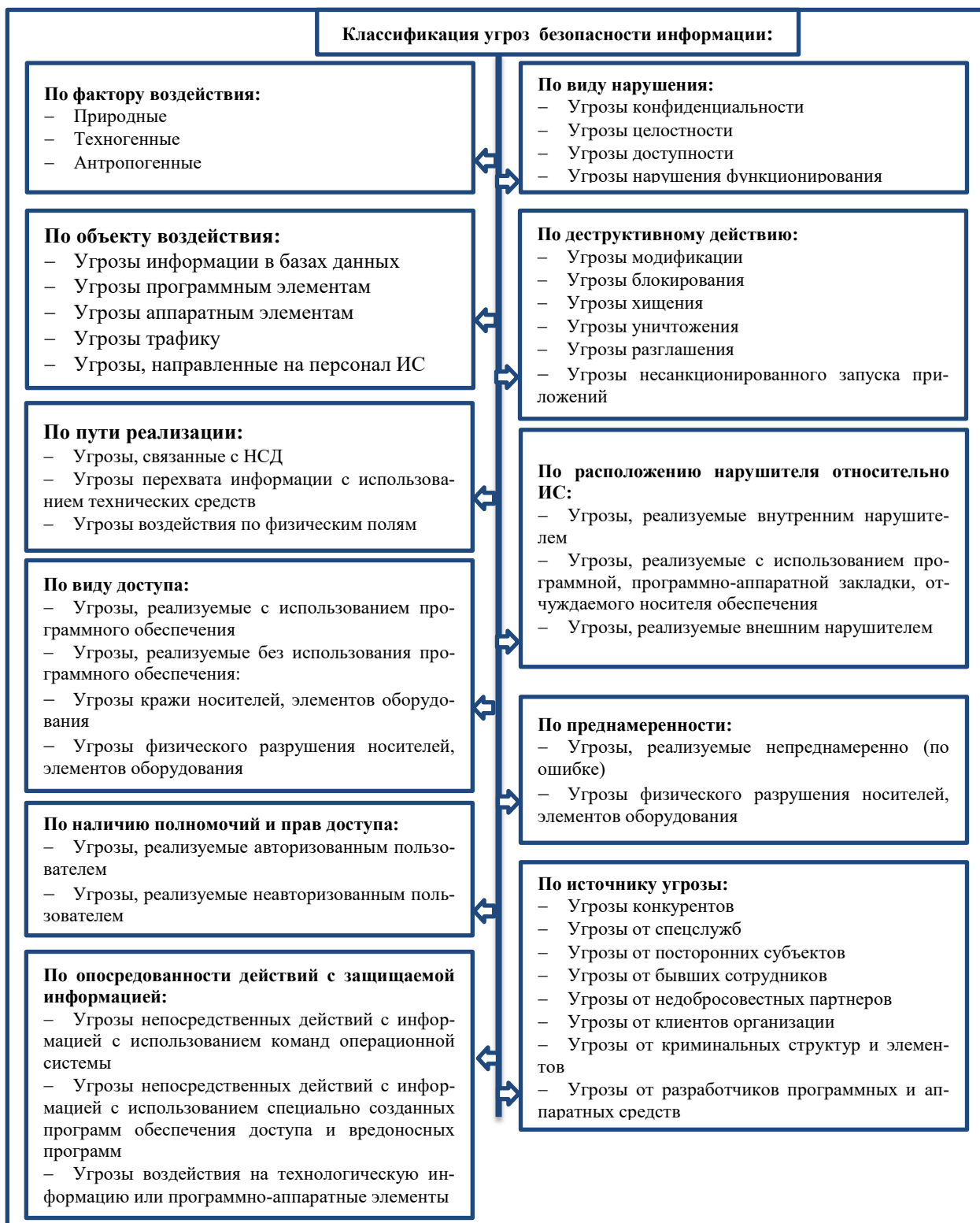


Рис. 3. Классификация угроз безопасности информации АС ОВД РФ с учетом веб-серверов
Fig. 3. Classification of threats to the security of information of the ATS of the Russian Federation, taking into account web servers

Ущерб, полученные в результате атак на информационный ресурс АС ОВД РФ:

1. Отказ в обслуживании подразумевает под собой недоступность запрашиваемых ресурсов, путем временного нарушения работоспособности АС ОВД РФ.
2. Утечка данных означает передачу конфиденциальной информации третьим лицам.

3. Повреждение либо изменение данных обозначает нарушение целостности информации, часто приводящее к невозможности её использования.
4. Репутационными потерями являются потери финансового типа.
5. После использования ресурсов сервера вредоносными ПО может произойти, например, снижение производительности, отзывчивости ОС.
6. Использование скомпрометированных данных подразумевает под собой использование конфиденциальных данных третьими лицами.
7. Значительное замедление времени ответа на запросы означает уменьшение работоспособности системы в целом.

Обсуждение результатов. Для обобщения всего многообразия угроз была разработана классификационная схема угроз безопасности информации АС ОВД РФ с учетом веб-серверов (рис. 3). Проведенный в статье анализ позволил выявить и определить отличительные свойства защищенных АС ОВД РФ, к которым можно отнести [2, 7, 9]:

- значительное местоположение защищенных АС ОВД РФ;
- потребность в создании и администрировании защищенной сетевой инфраструктуры, регламентированную нормативными документами;
- организация управления доступом АС ОВД РФ;
- обеспечение поддержания надлежащего уровня ИБ за счет проведения регулярных комплексных проверок АС ОВД;
- объединение АС ОВД в единый массив банков данных различного уровня конфиденциальности информации (применительно к ОВД информация объединяется в единый банк данных, что по своей сути ведет к увеличению уязвимостей и сложностям в администрировании с точки зрения ИБ);
- нахождение в составе АС ОВД несертифицированного прикладного ПО (требования по ИБ не учитывают влияния прикладного ПО);
- сложность в хранении больших массивов данных.

Вывод. Материалы статьи могут быть использованы для разработки методик:

1. Методики количественной оценки рисков нарушения информационной безопасности web-серверов АС ОВД РФ;
2. Методики оценки уровня защищенности АС ОВД РФ;
3. Методики доступа штатных пользователей АС ОВД РФ к информационному ресурсу этих систем на основе семантического анализа.

Библиографический список:

1. Язов Ю.К., Соловьев С.В. Защита информации в информационных системах от несанкционированного доступа. Пособие – Воронеж: Кварта, 2015. – 440 с.
2. Анализ рисков ущерба от угроз информационной безопасности в информационно-технических системах органов внутренних дел: монография / Т. В. Мещерякова, Е. А. Рогозин, И. В. Алехин [и др.]. — Воронеж: Воронежский институт МВД России, 2021. — 63 с.
3. Мишин С.А., Вольф В.А., Нестеровский О.И., Рогозин Е.А., Калач А.В. Анализ нормативной документации ФСТЭК РОССИИ с целью оценки защищенности операционных систем автоматизированных систем органов внутренних дел // Вестник Воронежского института ФСИН России, №2, (2022). – С. 111-120.
4. Мочалов Д.А., Вольф В.А., Романова В.Р., Рогозин Е.А., Калач А.В. Анализ существующих угроз внешнего нарушителя к информационному ресурсу веб-серверов в автоматизированных системах вооруженных сил российской федерации // Вестник Воронежского института ФСИН России №1–2022. С. 68-75.
5. Об утверждении Концепции обеспечения информационной безопасности органов внутренних дел Российской Федерации до 2020 года: приказ МВД России от 14.03.2012 № 169 [Эл. ресурс]. Режим доступа: <http://policemagazine.ru/forum/showthread.php?t=3663> (Дата обращения: 06.11.2022).
6. ФСТЭК России. Методический документ. Методика оценки угроз безопасности информации (утв. ФСТЭК России 5 февраля 2021 г.) [Эл.ресурс]. – Режим доступа: <http://fstec.ru/tekhnicheskaya-zashchita-informatsii/dokumenty/114-spetsialnye-normativnye-dokumenty/2170-metodicheskij-dokument-utverzhdhen-fstek-rossii-5-fevralya-2021>– (Дата обращения: 10.11.2022).
7. ФСТЭК России. Банк данных угроз безопасности информации. Угрозы безопасности информации [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://bdu.fstec.ru/threat>.– (Дата обращения: 10.11.2022).

8. Об утверждении Доктрины информационной безопасности Российской Федерации : указ Президента РФ от 05.12.2016 № 646 // СПС «КонсультантПлюс» (дата обращения: 07.03.2018).
9. Попов А.Д. Модели и алгоритмы оценки эффективности типовых систем защиты информации от несанкционированного доступа в автоматизированных системах органов внутренних дел: дис. канд. технич. наук 05.13.19 / Попов А.Д. – Воронеж., 2020. – 108 с.
10. Системы обнаружения компьютерных атак : учебное пособие / В. Т. Еременко, А. П. Фисун, С. М. Макеев, Б. И. Соловьев, Д. О. Маркин. - Орёл : ОГУ имени И. С. Тургенева, 2018. - 135 с.

References:

1. Yazov Yu.K., Soloviev S.V. Protection of information in information systems from unauthorized access. *Allowance.Voronezh: Quarta*, 2015; 440.[In Russ]
2. Risk analysis of damage from threats to information security in the information and technical systems of internal affairs bodies: monograph.T. V. Meshcheryakova, E. A. Rogozin, I. V. Alekhin [and others]. *Voronezh: Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia*, 2021; 63.[In Russ]
3. Mishin S.A., Wolf V.A., Nesterovsky O.I., Rogozin E.A., Kalach A.V. Analysis of the regulatory documentation of the FSTEC of RUSSIA in order to assess the security of operating systems of automated systems of internal affairs bodies. *Bulletin of the Voronezh Institute of the Federal Penitentiary Service of Russia*, 2022; 2:111-120.[In Russ]
4. Mochalov D.A., Wolf V.A., Romanova V.R., Rogozin E.A., Kalach A.V. Analysis of the existing threats of an external intruder to the information resource of web servers in the automated systems of the armed forces of the Russian Federation. *Bulletin of the Voronezh Institute of the Federal Penitentiary Service of Russia*. 2022; 1: 68-75.[In Russ]
5. On the approval of the Concept for ensuring the information security of the internal affairs bodies of the Russian Federation until 2020: order of the Ministry of Internal Affairs of Russia dated March 14, 2012 No. 169 [El.res.] Access mode: <http://policemagazine.ru/forum/showthread.php?t=3663>. (Date of treatment: 06.11.2022) [In Russ]
6. FSTEC of Russia. Methodical document. Methodology for assessing threats to information security (approved by the FSTEC of Russia on February 5, 2021) [El.res.]. Access mode: <http://fstec.ru/tekhnicheskaya-zashchita-informatsii/dokumenty/114-spetsialnye-normativnye-dokumenty/2170-metodicheskij-dokument-utverzhdn-fstek-rossii-5-fevralya-2021>. (Date of treatment: 11/10/2022) [In Russ]
7. FSTEC of Russia. Data bank of information security threats. Information Security Threats [Electronic resource]. Access mode: <https://bdu.fstec.ru/threat>. – (Date of access: 11/10/2022) [In Russ]
8. On approval of the Doctrine of Information Security of the Russian Federation: Decree of the President of the Russian Federation dated 05.12.2016 No. 646. *SPS "ConsultantPlus"*(date of access:03/07/2018)[In Russ]
9. Popov A.D. Models and algorithms for evaluating the effectiveness of typical systems for protecting information from unauthorized access in automated systems of internal affairs bodies: dis. cand. tech. Sciences 05.13.19 / Popov A.D. - Voronezh., 2020;108.[In Russ]
10. Computer attack detection systems: textbook. V. T. Eremenko, A. P. Fisun, S. M. Makeev, B. I. Soloviev, D. O. Markin. - Eagle: OSU named after I. S. Turgenev, 2018; 135. [In Russ]

Сведения об авторах:

Ефимов Алексей Олегович, адъюнкт очной формы обучения; ea.aleksei@yandex.ru

Наседкина Валерия Сергеевна, адъюнкт; valeriya.sn@mail.ru.

Попов Антон Дмитриевич, кандидат технических наук, старший преподаватель; anton.holmes@mail.ru

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

Романова Виктория Романовна, адъюнкт очной формы обучения; romanovna_vika@inbox.ru

Information about authors:

Aleksey O. Yefimov, full-time adjunct; ea.aleksei@yandex.ru

Valeria S. Nasedkina, adjunct; valeriya.sn@mail.ru.

Anton D. Popov, Cand. Sci. (Eng.), Senior lecturer; anton.holmes@mail.ru

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

Victoria R. Romanova, adjunct of full-time education; 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 28.11.2022.

Одобрена после рецензирования/ Revised 22.12.2022.

Принята в печать/Accepted for publication 22.12.2022.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 621.31

DOI: 10.21822/2073-6185-2023-50-1-89-98

Оригинальная статья /Original Paper

**Принципы построения многофункционального интеллектуального
счётчика электрической энергии с расширенными коммуникационными
и функциональными возможностями**

И.А. Магомедов, М.Н. Хидивов, А.И. Магомедов

Дагестанский государственный технический университет,
367026, г. Махачкала, пр. И. Шамиля, 70, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является разработка принципов построения многофункционального интеллектуального счётчика электрической энергии (МИСЭЭ) с расширенными коммуникационными и функциональными возможностями; построение на их основе МИСЭЭ для автоматизированных систем коммерческого учёта энергопотребления (АСКУЭ). **Метод.** Проведён анализ существующих приборов учёта электрической энергии и выявлены основные их недостатки, которые позволили улучшить характеристики и расширить функциональные возможности приборов учёта. Работоспособность основных узлов МИСЭЭ подтверждается результатами математического и физического моделирования, которые показали возможность достижения метрологических характеристик и технических параметров, определяющие количественные, качественные и стоимостные характеристики приборов. **Результат.** Разработаны принципы построения МИСЭЭ, что позволит создавать МИСЭЭ с расширенными коммуникационными и функциональными возможностями для АСКУЭ. **Вывод.** Использование их в АСКУЭ позволяет: строить на их основе само настраиваемые ячеистые сети, которые могут быть использованы при построении АСКУЭ с повышенной живучестью; обеспечить обмен учётной и служебной информацией с АСКУЭ по радиоканалу, PCL-модему и интерфейсу RS-485 (CAN), что повышает достоверность получения учётной информации и интегрировать МИСЭЭ в существующие АСКУЭ, т.к. дает возможность выбора соответствующего типу конкретной АСКУЭ интерфейса или интерфейсов связи «счётчик-АСКУЭ»; регулировать энергопотребления и независимое отключение потребителя от сети по каждому абонентскому блоку в случае наличия задолженности по платежам, при перегрузке сети и несанкционированном доступе к узлам и блокам счётчика различными способами; улучшить условия эксплуатации счётчика при организации электронных платежей и повышения достоверности учётной информации за счёт бесконтактного дистанционного съёма информации посредством интерфейсов связи по каждому абоненту или посредством индивидуального пульта дистанционного управления (ПДУ); уменьшить аппаратные затраты на обслуживание одного абонента, связанное с использованием основных узлов и блоков счётчика для учёта энергопотребления по всем абонентам.

Ключевые слова: интеллектуальный счётчик, ячеистая сеть, многокальный счётчик, интерфейс связи, радиомодем, радиоканал, АСКУЭ, МИСЭЭ

Для цитирования: И.А. Магомедов, М.Н. Хидивов, А.И. Магомедов. Принципы построения многофункционального интеллектуального счётчика электрической энергии с расширенными коммуникационными и функциональными возможностями. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023; 50(1):89-98. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-1-89-98

**Principles of construction of a multifunctional intelligent electric energy meter
with advanced communication and functional capabilities**

I.A. Magomedov, M.N. Khidivov, A.I. Magomedov

Daghestan State Technical University,
70 I.Shamil Ave., Makhachkala 367026, Russia

Abstract. Objective. Development of principles for the construction of a multifunctional intelligent electric energy meter (MSE) with expanded communication and functional capabilities and the construction of MSE based on them for automated systems of commercial accounting of energy consumption (ASKUE). **Method.** When developing the principles of the construction of the IEE, an analysis of existing electric energy metering devices was carried out and their main disadvantages were identified, which made it possible to improve the characteristics and expand the functionality of metering devices. The operability of the main components of the IEE is confirmed by the results of mathematical and physical modeling, which showed the possibility of improving the metrological characteristics and technical parameters that determine the quantitative, qualitative and cost characteristics of the devices. **Result.** The principles of the construction of the IEE have been developed, which makes it possible to create IEE with expanded communication and functional capabilities for the ASUE. **Conclusion.** Using them in ASCUE possible: -to build self-adjusting mesh networks based on them, which can be used in the construction of ASCS with increased survivability; -to ensure the exchange of accounting and service information with the ASKUE over the radio channel, PCL modem and RS-485 (CAN) interface, which increases the reliability of obtaining accounting information and integrate the MISEE into existing ASKUE, because it makes it possible to select the appropriate type of specific ASKUE interface or communication interfaces "counter-ASKUE";- regulate energy consumption and independent disconnection of the consumer from the network for each subscriber unit (separately for each subscriber) in case of arrears of payments, network overload and unauthorized access to the nodes and blocks of the meter in various ways;- to improve the operating conditions of the meter when organizing electronic payments and increasing the reliability of accounting information due to contactless remote removal of information by means of communication interfaces for each subscriber or by means of an individual remote control (remote control).-to reduce the hardware costs of servicing one subscriber associated with the use of the main units and units of the meter to account for energy consumption for all subscribers, and, as a result, the low cost of electricity metering in recalculation per subscriber.

Keywords: intelligent counter, mesh network, multichannel counter, communication interface, radio modem, radio channel, ASKUE, MISEE

For citation: I.A. Magomedov, M.N. Khidivov, A.I. Magomedov. Principles of construction of a multifunctional intelligent electric energy meter with advanced communication and functional capabilities. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science. 2023; 50 (1): 89-98. DOI: 10.21822 /2073-6185-2023-50-1-89-98

Введение. Современная торговля энергоресурсами основана на использовании автоматизированного приборного энергоучета, сводящего к минимуму участие человека на этапе измерения, сбора и обработки данных и обеспечивающего достоверный, точный, оперативный и гибкий, адаптируемый к различным тарифным системам учет, как со стороны поставщика энергоресурсов, так и со стороны потребителя. Этим и обусловлено появление, и развитие нового класса автоматизированных систем [1-9] - автоматизированных систем коммерческого учета энергоресурсов (АСКУЭ). При наличии современной АСКУЭ полностью контролируется весь процесс энергопотребления и имеется возможность по согласованию с поставщиками энергоресурсов гибко переходить к разным тарифным системам, минимизируя энергозатраты.

Первым шагом на пути к энергоэффективности должны стать меры по составлению полной картины и пониманию ответственными органами власти и муниципальными властями энергопотребления конкретных потребителей и потерь на всех этапах доставки энергии потребителю. С этой целью в работе проведён анализ [1-9] существующих проблем в автоматизации учёта энергопотребления, методов и средств построения АСКУЭ и приборов первичного учёта электроэнергии.

Постановка задачи. Проблему автоматизированного учёта энергопотребления пытаются решить сами поставщики электроэнергии по отдельности под свои требования

и/или научные организации, но отсутствие единого подхода и единых требований по организации АСКУЭ приводит к тому, что появляется очередная система, которая ориентирована на определённые типы первичных приборов по учету энергопотребления, а дальнейшее продвижение ее на рынок упирается на не согласованность данной системы по программным, информационным и аппаратным вопросам с другими типами приборов учета. Это связано с тем, что нет нормативных документов, где расписаны все вопросы по организации АСКУЭ и приведены требования к самым приборам учета электроэнергии по протоколам обмена, форматам и системам команд, кодировке команд, по типам средств связи и другим параметрам. Такое положение приводит к тому, что на рынке автоматизированных систем по учету электроэнергии появляются все новые системы, которые не всегда могут быть использованы с другими типами приборов и /или другими поставщиками электроэнергии. Все указанные проблемы построения АСКУЭ, приводит к неэффективному использованию энергоресурсов и высоким коммерческим потерям электроэнергии.

Важность решения вопроса построения АСКУЭ определяется, во-первых, большими коммерческими потерями электроэнергии в электрических сетях напряжением 0,4 кВ. При этом, основные потери связаны с хищениями электроэнергии, как потребителями, так и представителями поставщиков, а, во-вторых, достижениями в области цифровой электроники и информационных технологий, что позволяет разрабатывать недорогие высокоточные с расширенными коммутационными возможностями приборы первичного учёта электроэнергии, на базе которых строится АСКУЭ с широкими функциональными возможностями.

Методы исследования. Анализ литературных источников показал [1,2, 10-15], что в настоящее время на рынке отсутствуют многофункциональные интеллектуальные приборы учёта электроэнергии, которые могут быть использованы для построения самоорганизующихся сетей счётчиков микрорайона с целью построения АСКУЭ с повышенной живучестью и ведения учёта в многоквартирных домах.

Отсутствие интеллектуальных счётчиков электрической энергии (ИСЭЭ) с расширенными коммуникационными и функциональными возможностями и АСКУЭ приводит к неэффективному использованию и потерям электрической энергии. По нашим данным, в некоторых районах РД потери электроэнергии составляют до 42%, что связано с отсутствием надёжно защищённых от несанкционированного доступа приборов учёта и АСКУЭ на их основе.

Основными недостатками существующих счётчиков является отсутствие системного подхода к их проектированию, так как при проектировании не учитываются:

- особенности мест установки приборов учета, влияние внешних воздействий (преднамеренных и/или непреднамеренных) на процесс функционирования приборов учета и системы в целом;
- влияния человеческого фактора на процессы сбора, обработки и хранения учетной и служебной информации;
- особенности функционирования и эффективность использования средств связи, встроенных в приборы учёта в городских условиях и сельской местности. Так, использования только одного радиомодема в качестве интерфейса связи для сбора учётной информации приводит к сбоям в 45-60% счётчиках, интегрированных в АСКУЭ;
- возможность интеграции новых приборов в существующие системы учета;
- возможность использования двух и более встроенных в приборы учета интерфейсов связи для организации обмена данными с АСКУЭ и построения на их основе самонастраиваемой ячеистой сети приборов учета электроэнергии;
- низкая надёжность каналов связи и, как следствие, невысокая живучесть системы в целом, что приводит к необоснованно большим потерям электроэнергии;

- диспетчерский опыт и его знания в области управления распределением электроэнергии в энергетических сетях.

Для решения указанных проблем в работе разработаны принципы построения многофункционального интеллектуального счётчика электрической энергии (МИСЭЭ), который позволит строить самоорганизующихся и самонастраиваемые ячеистые сети счётчиков электроэнергии и АСКУЭ на их основе.

Приборы первичного учёта электроэнергии должны:

- быть построены: на базе современных микроконтроллеров, что позволит обеспечивать широкие функциональные возможности приборов и создавать гибкие структуры сетей с учётом мест установок приборов; по модульному принципу, что позволит существенно сократить время восстановления приборов и их ремонтно-пригодность, а также адаптировать приборы учёта к требованиям поставщиков энергоресурсов;
- иметь: широкий набор встроенных проводных и беспроводных интерфейсов связи, что позволит повысить надёжность каналов связи за счёт их дублирования; возможность централизованного контроля состояния приборов учёта и отдельных составляющих сети; аппаратные и программные средства использования их при построении ячеистых сетей приборов учёта в качестве маршрутизаторов; программное обеспечение самоорганизации и самонастройки ячеистых сетей с целью формирования маршрутов обмена данными с координатором ячеистой сети и обхода не работающего узла сети, что позволит повысить живучесть системы в целом за счёт динамической и/или статической реконфигурации каналов связи; встроенные аппаратно-программные средства защиты учётной и служебной информации от несанкционированного доступа (НСД), а также программные средства оповещения координатора сети о наличии признака НСД в сетях.

Наличие указанных средств исключает влияние человеческого фактора на процесс сбора, обработки и хранения данных в системе; аппаратно-программные средства управления нагрузкой и средства защиты приборов от перегрузок, предназначенных для защиты приборов учета и силовых сетей от перегрузки.

Наличие указанных средств позволит: упорядочить платежи, т.к. срок оплаты не привязан к началу или к концу месяца, а зависит от дня установки счетчика потребителю; сократить количества работников контролирующих органов до 70%, т.к. отпадает необходимость контроля всех потребителей электрической энергии. Это связано с тем, что список должников ежедневно будет формировать в АСКУЭ по известным срокам установки счётчика.

Сокращение штата приводит к экономии заработной платы и к уменьшению влияния человеческого фактора на процесс учета электроэнергии; избежать веерное отключение потребителей и накопление долгов за энергопотребление, т.к. появляется возможность адресного отключения потребителя за неплатежи; практически исключить возможность хищения электроэнергии и уменьшить коммерческие потери, так как при попытке несанкционированного доступа к узлам счётчика датчики несанкционированного доступа информирует процессор счётчика об этом, а процессор в свою очередь отключает потребителя от сети, сохраняет в памяти показания и посредством интерфейсов связи информирует АСКУЭ о несанкционированном доступе. Обратное подключение можно производить только по команде с АСКУЭ после проведения соответствующих оговорённых при заключении договора процедур.

Обсуждение результатов. На основе указанных выше принципов, в качестве примера, в статье рассматривается трёхканальный многофункциональный ИСЭЭ, построенный по модульному принципу [13-15] с соответствующим программным обеспечением [10,16,17]. Трёхканальный вариант МИСЭЭ может быть использован в качестве: автономного трёхфазного счётчика для измерения активной и реактивной электрической энергии в соответствии с действующими ГОСТами, а также в составе АСКУЭ; базового (балансово-

го) трёхфазного счётчика, устанавливаемый на трансформаторной подстанции микрорайона.

Использование балансового трёхфазного счётчика в качестве координатора, а абонентских счётчиков в качестве маршрутизаторов ячеистых сетей счётчиков (рис.1), позволит производить сбор учётной и служебной информации счётчиков без дополнительного сетевого оборудования, что снижает стоимость АСКУЭ в целом и повышает ее живучесть.

Кроме того, использование трёхканального МИСЭЭ в трёхфазных сетях в режиме балансового счётчика для ведения учёта по фазам в отдельности и суммарного учёта показаний абонентских СЭЭ позволит обнаруживать канал хищения электроэнергии в микрорайоне с точностью до группы счётчиков, подключённых к фазе; координатора самонастраиваемых ячеистых сетей абонентских однофазных, трёхфазных и многоканальных счётчиков электрической энергии, также устанавливаемый на трансформаторной подстанции микрорайона или в подъездах многоэтажных домов.

Трёхканальный вариант МИСЭЭ в режиме координатора сети снабжён расширенными коммуникационными средствами, такими как радио-модем, PLC-модема RS-485 для связи с абонентскими счётчиками, и GSM-модемом для связи с АСКУЭ с соответствующим программным обеспечением и предназначен для настройки ячеистой сети приборов учёта, а также сбора учётной и служебной информации со всех абонентских счётчиков, устанавливаемых в частном секторе жилого массива и с многоканальных однофазных счётчиков, устанавливаемых на лестничной площадке многоэтажных домов.

На рис.1 приведён фрагмент схемы самонастраиваемой ячеистой сети приборов учёта электроэнергии, построенной с использованием МИСЭЭ в различных режимах работы и вариантах построения.

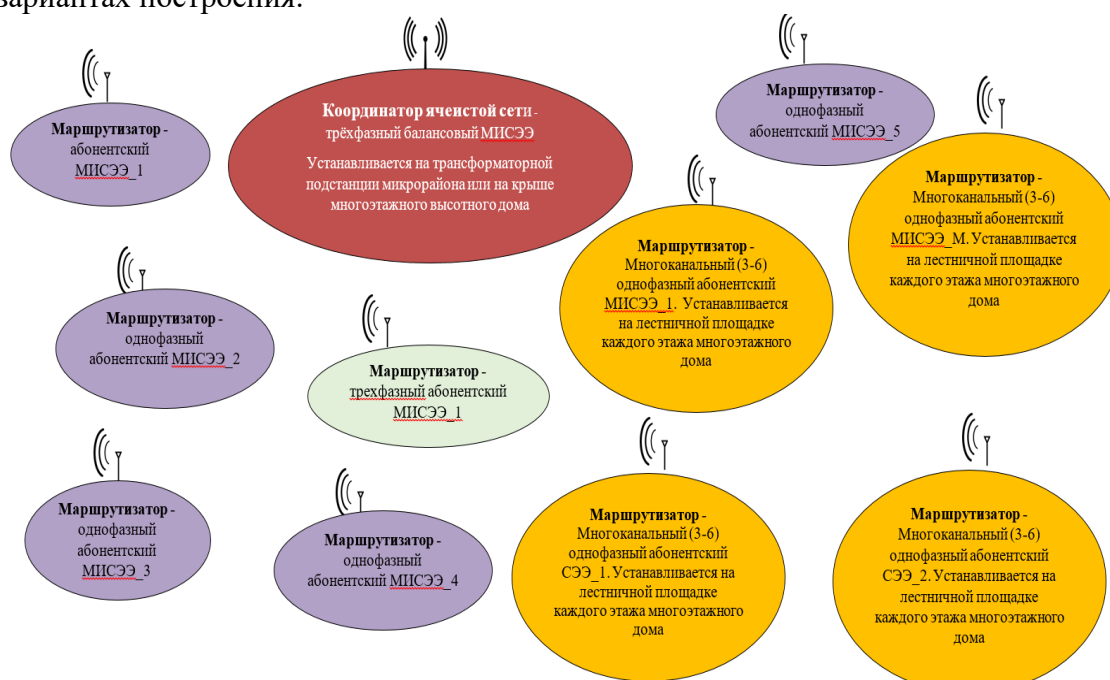


Рис. 1. Фрагмент схемы самонастраиваемой ячеистой сети приборов учёта электроэнергии (координатор ячеистой сети, он же и трёхфазный балансовый МИСЭЭ)

Fig. 1. A fragment of a self-adjusting mesh network diagram of electricity metering devices (mesh network coordinator, it is also a three-phase balance MISEE)

Особенностью ячеистых сетей является их способность к самоорганизации с целью формирования маршрута обмена данными с координатором ячеистой сети, добавления нового узла и обхода, не работающего узла сети, что повышает живучесть системы в целом за счёт динамической и/или статической реконфигурации каналов связи.

При необходимости получения данных или управлять удалённым узлом, к которому нет доступа на прямую с АСКУЭ, сеть сама строит маршрут от координатора до конечной точки. Маршрутов могут быть несколько, как и критериев выбора маршрута: по уровню помех, по скорости работы, по метрике и т.д. В случае если какие-то узлы появляются в сети или удаляются из неё, то топология заново пересчитывается. Это происходит автоматически, как только до узла нужно организовать связь. При этом в качестве интерфейса связи «счётчик - координатор» используется радиоканал, а для связи «координатор-АСКУЭ» используется GSM- модем, что также упрощает проблему обмена данным в системах учёта энергопотребления.

Особое внимание необходимо обратить на вопросы построения радиоканала в МИСЭЭ, от которого большей степени зависит надёжность ячеистой сети приборов учёта электроэнергии. Из сферы ячеистых сетей, самым известным протоколом является ZigBee – технология, которая основана на радио стандарте IEEE 802.15.4 и, предназначенная для стандартизации маломощных M2M устройств разных производителей [2,19, 20-28].

Из особенностей сети можно выделить высокую отказоустойчивость, длительный срок службы конечных устройств от одной батареи, поддержку большого количества подключений и совместную работу устройств разных производителей. ZigBee предусматривает передачу информации в радиусе от 5 до 75 метров с максимальной скоростью 250 кбит/с. Но минусом протокола ZigBee является относительно высокая стоимость за модуль и расстояние приема-передачи.

Другой известный протокол LoRaWan. Протокол беспроводной связи LoRaWAN (Long Range Wide Area Networks), протокол, обеспечивающий межмашинное взаимодействие на расстоянии до 15 км (при прямой видимости), при этом имея низкое энергопотребление. Недостатком сетей на основе LoRa является невысокая скорость в 1 Кб/сек.

В МСЭЭ может быть встроен ZigBee-модуль или LoRa –модуль в зависимости от месторасположения сети. Использование единого алгоритма самоорганизации и самовосстановления (на базе радио-модема и PLC-модема) топологии сетей счетчиков с ретрансляцией и маршрутизацией сообщений обеспечивает простоту обслуживания, развёртывания и модернизации. В такой сети, каждый счётчик может связываться с любым другим счётчиком как напрямую, так и через промежуточные счётчики сети, так как на однофазные одноканальные и многоканальные абонентские счётчики в ячеистой сети возложены функции маршрутизаторов, что даёт возможность формирования альтернативных вариантов маршрутов передачи данных между счётчиками. Сообщения поступают от счётчика к счётчику, пока не достигнут конечного получателя.

Как известно, в ячеистой топологии сети каждый узел выступает в роли маршрутизатора и требует относительно больших вычислительных мощностей, что увеличивает стоимость узла в сети. Поэтому в статье предложен упрощённый алгоритм построения ячеистой топологии сети, где использовано дерево из самонастраиваемых и автоматически авторизующихся в сети узлов (абонентских счётчиков). Топология такой сети представлена на рис. 2.

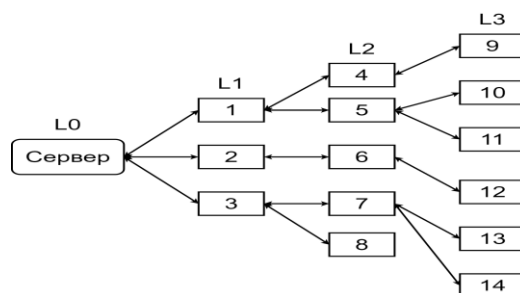


Рис. 2. Топология «Динамическое дерево»
Fig. 2. Topology "Dynamic tree"

Каждый узел (счётчик) в топологии «динамическое дерево», имеет свой уровень и уникальный адрес. Узлы могут быть различными по типу счётчика: однофазный, многоканальный и трёхфазный ИСЭЭ.

Работу узлов в сети можно разделить на 3 отдельных функциональных этапа:

1. Регистрация в сети. Узел, впервые включившись в сеть или потеряв предыдущий ведущий узел, начинает с определенным периодом отправлять в сеть сообщение о том, что этот узел ищет новый ведущий узел. Далее узлы, которые получают это сообщение, отправляют обратно сообщение о том, что готовы принять этот узел в свои ведомые, вместе с данными о качестве приема сигнала и уровне этого узла. Регистрируемый узел в сети выбирает среди полученных сообщений лучший ведущий узел по показателям и отправляет сообщение этому узлу о том, что хочет стать его ведомым устройством.
2. Сбор показателей и отправка на сервер. Узел работает в режиме учёта электроэнергии и отправляет ведущему устройству сообщение со своим адресом отправителя и адресом сервера как получателя.
3. Обработка сообщений от других узлов. Узел постоянно получает и обрабатывает все сообщения от доступных ему узлов. Если сообщение предназначено серверу от его ведомых узлов, то оно отправляется дальше ведущему узлу уже этого узла. Если сообщение предназначено этому узлу, то происходит обработка сообщения относительно типа, указанного в сообщении. Если сообщение не предназначено этому узлу, то оно просто отбрасывается.

При выключении какого-то узла в сети, ведомый узел выбирает себе новый ведущий узел, при этом, не разъединяясь с ведомыми им самим узлами. Таким образом, вся сеть не перенастраивается, перенастраивается только один узел. Как понятно из описания топологии, данные при такой топологии не идут по заранее определённом маршрутизатором пути, а следуют по веткам выстроенного по наилучшим параметрам на текущий момент дерева.

Алгоритм работы узла, если упростить, представляет собой бесконечный цикл прослушки радиосети и опроса новых незарегистрированных узлов. Алгоритм состоит из функций настройки ячейки и авторизации ячейки, блока анализа сообщений в сети и выполнения команд и блока таймеров. Первый блок делится на прием/обработку пакета и на часть обработки команд. Во втором блоке содержатся таймеры, которые необходимы для снижения загруженности сети путем отправки сообщений в каком-то промежутке времени.

Вывод. В работе проведён анализ современного состояния аппаратных средств построения АСКУЭ, указаны основные их недостатки, которые приводит к неэффективному использованию энергоресурсов и высоким коммерческим потерям электроэнергии. Для построения высоконадёжных АСКУЭ разработаны основные принципы построения многофункционального интеллектуального счётчика электрической энергии (МИСЭЭ) с расширенными коммуникационными и функциональными возможностями. На основе указанных принципов построен, в качестве примера, трёхканальный счётчик, который может быть использован, и как автономный трёхфазный счётчик по учёту энергопотребления в трёхфазных сетях переменного тока, и как базовый (балансовый) трёхфазный счётчик, устанавливаемый на трансформаторной подстанции микрорайона, и как координатор в самонастраивающихся ячеистых сетях абонентских однофазных, трёхфазный и многоканальных счётчиков электрической энергии, также устанавливаемый на трансформаторной подстанции микрорайона или в подъездах многоэтажных домов.

Библиографический список:

1. Максимова А.М. Автоматизированная система коммерческого учета электроэнергии на современном рынке электроэнергии//Молодой учёный.-2016.-№21(125).-С.177-179.-RL:<https://moluch.ru/archive/125/34876/>(дата обращения: 29.10.2022).
2. <https://habr.com/ru/post/421653/>
3. Киреева, Е. В. "АСКУЭ "Энергомера" на базе технологии ZigBeer - надёжность и уверенность / Е. В. Киреева, С. А. Жижикин // Энергетик. – 2011. – № 8. – С. 56. – EDN OBGBJD.

4. Мякочина, М. Архитектура АСКУЭ на базе решений компании «Миландр» / М. Мякочина // Компоненты и технологии. – 2015. – № 5(166). – С. 108-111. – EDN TRLHSH.
5. <http://www.ackye.ru/activities/sozдание-askue/>
6. <https://tokzamer.ru/novosti/askue-princip-raboty>
7. Данилин А. В. Принципы построения и работы АСКУЭ/Энергетика и промышленность России. № 5 (45) май 2004 года
8. Загаина, Е. А. Эффективность внедрения АСКУЭ в России и зарубежом / Е. А. Загаина, Е. Ю. Пузина // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири: Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Иркутск, 24–28 апреля 2017 года / Иркутск: Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2017. – С. 130-134. – EDN ZIXLXT.
9. Магомедов И.А., Ныров В.Г., Далгатов Д.К. Программное обеспечение автоматизированной системы коммерческого учета электроэнергии с расширенными коммуникационными и функциональными возможностями/Свидетельство о регистрации программ для ЭВМ №2018617635, Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 27 июня 2018г.
10. Магомедов И.А., Рамазанова Х. М Программное обеспечение системы автоматизированного учета коммунальных услуг с расширенными коммуникационными и функциональными возможностями/Свидетельство о регистрации программ для ЭВМ №2020660042, Дата Государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 26.08.2020.
11. Магомедов И.А., Абдулкаримов З.И. Структурная организация беспроводных автоматизированных систем коммерческого учета электроэнергии. Туполевские чтения: Международная молодёжная научная конференция, посвящённая 1000-летию Казани, 10-11 ноября 2005 года. Материалы конференции. Том II.- Казань: Казан. Гос. Техн. Ун-т, 2005.-С. 256.
12. Курбанов Д.С., Магомедов И.А., Курбанмагомедов К. Д., Аппаратное обеспечение и принципы построения АСКУЭ в бытовом секторе со свойствами встроенного контроля и самодиагностирования /Энергосбережение и водоподготовка, 2010, №2 (64), с.32-35
13. Магомедов И.А., Магомедов А.И., Курбанов Д.С. и др. Многоабонентский цифровой счётчик электрической энергии с дистанционным управлением/Патент РФ на полезную модель №152097 Оpubл. 10.05.2015 Бюл. № 13
14. Магомедов И.А., Магомедов А.И., Курбанов Д.С. Трёхфазный балансовый счетчик электрической энергии с дистанционным управлением/Патент РФ на полезную модель 186740, Оpubл. 31.01.2019, Бюл. № 4.
15. Магомедов А.И., Магомедов И.А. Интеллектуальный счётчик электрической энергии/Матер. докл. VIII междунар. молодежной науч. конф. «Тирчуринские чтения»/ в 4 т., Т. 1.-Казань: Казан. Энерг. Ун-т, 2013.-с. 224.
16. Магомедов И.А., Курбанов Д.С., Магомедов А.И. Программное обеспечение счетчиков электрической энергии с расширенными коммуникационными и функциональными возможностями/Свидетельство о регистрации программ для ЭВМ №2018617495, Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 25 июня 2018г.
17. Магомедов И.А., Шихалиев Ш.Х. Программа инициализации микроконтроллера, обмена данными с радиомодемом и настройки ячеистой сети приборов учета энергопотребления/Свидетельство о регистрации программ для ЭВМ №2021610702, Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 19.01.2021.
18. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021610702 Российская Федерация. Программа инициализации микроконтроллера, обмена данными с радиомодемом и настройки ячеистой сети приборов учета энергопотребления: № 2021610042: заявл. 11.01.2021 : опубл. 19.01.2021 / Ш. Х. Шихалиев, И. А. Магомедов; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Дагестанский государственный технический университет». – EDN DIURDO.
19. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020660378 Российская Федерация. Программное обеспечение системы определения параметров ячеистой сети: № 2020619053 : заявл. 13.08.2020 : опубл. 02.09.2020 / А. Р. Рамазанов, И. А. Магомедов; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Дагестанский государственный технический университет». – EDN BHUNIO.
20. Коскинен, П. Реализация ячеистой сети с высокой дальностью действия / П. Коскинен, К. Татополос // Беспроводные технологии. – 2007. – № 2(7). – С. 52-53. – EDN MTGBDX.
21. Лидский, Э. А. Оптимизация маршрута в ячеистых сетях связи / Э. А. Лидский // Телекоммуникации. – 2009. – № 10. – С. 10-14. – EDN KZETMJ.
22. Патент № 2468536 С2 Российская Федерация, МПК H04W 48/20. Маршрутизация в ячеистой сети : № 2010112992/07 : заявл. 03.09.2008 : опубл. 27.11.2012 / А. Стамоулис, А. Сампатх. – EDN SQLZRJ.

23. Магомедов, И. А. Принципы построения ячеистой сети распределённых вычислителей / И. А. Магомедов, М. М. Абдулкадирова, И. Б. Бийболатов // Неделя науки - 2021 : Сборник материалов 42 итоговой научно-технической конференции преподавателей, сотрудников, аспирантов и студентов ДГТУ, Махачкала, 17–22 мая 2021 года. – Махачкала: ФОРМАТ, 2021. – С. 52-54. – EDN HKWQ CZ.
24. Ключников, В. О. Выбор оптимального протокола маршрутизации в беспроводных сенсорных сетях передачи данных / В. О. Ключников // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2020. – Т. 8. – № 2(29). – DOI 10.26102/2310-6018/2020.29.2.038. – EDN ZAAZHN.
25. Игнатов, Р. А. Протоколы маршрутизации в беспроводных сенсорных сетях / Р. А. Игнатов, В. В. Лосев // APRIORI. Серия: Естественные и технические науки. – 2018. – № 2. – С. 10. – EDN YVMXQH.
26. Фам, В. Д. Исследование использования протокола AODV в ячеистой сети LoRa / В. Д. Фам, Д. Т. Ле, Р. В. Киричек // Распределенные компьютерные и телекоммуникационные сети: управление, вычисление, связь (DCCN-2020) : материалы XXIII Международной научной конференции, Москва, 14–18 сентября 2020 года / под общ. ред. В. М. Вишневого, К. Е. Самуйлова. – Москва: Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, 2020. – С. 490-498. – DOI 10.25728/dccn.2020.062. – EDN ZUSSUF.
27. Писарчук, А. С. Анализ применения беспроводных самоорганизующихся сетей / А. С. Писарчук, Д. Д. Мельникова // The World of Science Without Borders, 11 февраля 2022 года, 2022. – Р. 314-316. – EDN LZWQRY.
28. Дементьева, А. К. Разработка системы контроля за учетом потребления энергоресурсов на базе самоорганизующихся беспроводных сетей / А. К. Дементьева, С. В. Елягин, А. Г. Френкель // REDS: Телекоммуникационные устройства и системы. – 2013. – Т. 3. – № 4. – С. 331-333. – EDN ZSUAPV.

References:

1. Maximova A.M. Automated system of commercial electricity metering in the modern electricity market//A young scientist.2016;21(125):177-179.-RL:<https://moluch.ru/archive/125/34876/> (accessed: 29.10.2022).
2. <https://habr.com/ru/post/421653/> [In Russ]
3. Kireeva, E. V. "ASKUE "Energomera" based on ZigBeer technology - reliability and confidence / E. V. Kireeva, S. A. Zizhikin . *Energetik*. 2011;8:56. – EDN OBGBJD. [In Russ]
4. Myakochina, M. Architecture of ASKUE based on solutions of the company "Milander". *Components and technologies*. 2015;5(166): 108-111. – EDN TRLHSH. [In Russ]
5. <http://www.ackye.ru/activities/sozdanie-askue/>
6. <https://tokzamer.ru/novosti/askue-princip-raboty>
7. Danilin A.V. Principles of the construction and operation of the ASKUE/Power engineering and industry of Russia. 2004;5 (45) [In Russ]
8. Zagaina, E. A. The effectiveness of the introduction of ASME in Russia and Abroad / E. A. Zagaina, E. Yu. Puzina // Improving the efficiency of energy production and use in Siberia: Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference with international participation, Irkutsk, April 24-28, 2017 *Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University*, 2017; 130-134. – EDN ZIXLXT. [In Russ]
9. Magomedov I.A., Nyrov V.G., Dalgatov D.K. Software for automated commercial electricity metering system with expanded communication and functional capabilities. Certificate of registration of computer programs No.2018617635, Date of state registration in the Register of computer Programs on June 27, 2018. [In Russ]
10. Magomedov I.A., Ramazanova H. M Software system of automated accounting of utilities with advanced communication and functionality. Certificate of registration of computer programs No. 2020660042, Date of State registration in the Register of computer programs 26.08.2020. [In Russ]
11. Magomedov I.A., Abdulkarimov Z.I. Structural organization of wireless automated systems of commercial accounting of electric energy. Tupolev Readings: International Youth Scientific Conference dedicated to the 1000th anniversary of Kazan, November 10-11, 2005. Conference materials. Volume II.- Kazan: Kazan. State Tech. Un-t, 2005; 256. [In Russ]
12. Kurbanov D.S., Magomedov I.A., Kurbanmagomedov K. D., Hardware support and principles of construction of ASCS in the domestic sector with the properties of built-in control and self-diagnosis. *Energy saving and water treatment*, 2010; 2 (64):32-35 [In Russ]
13. Magomedov I.A., Magomedov A.I., Kurbanov D.S., etc. Multi-subscriber digital electric energy meter with remote control/RF patent for utility model No. 152097 Publ. 10.05.2015; 13 [In Russ]
14. Magomedov I.A., Magomedov A.I., Kurbanov D.S. Three-phase ba-lance electric energy meter with remote control/RF patent for utility model 186740, Publ. 31.01.2019; 4 [In Russ]
15. Magomedov A.I., Magomedov I.A. Intelligent electric energy meter/Mater. docl. VIII international. youth scientific conference "Turchurin readings"/ in 4 vols., Vol. 1.-Kazan: Kazan. Energy. Un-t, 2013; 1:224. [In Russ]

16. Magomedov I.A., Kurbanov D.S., Magomedov A.I. Software for electric energy meters with advanced communication and functionality/Certificate of registration of computer programs No. 2018617495, Date of state registration in the Register of computer Programs June 25, 2018 [In Russ]
17. Magomedov I.A., Shikhaliev Sh.Kh. The program of initialization of the micro-controller, data exchange with the radio modem and configuration of the mesh network of energy metering devices. Certificate of registration of computer programs No. 2021610702, Date of state registration in the Register of computer programs 19.01.2021. [In Russ]
18. Certificate of state registration of the computer program No. 2021610702 Russian Federation. The program of initialization of the micro-controller, data exchange with a radio modem and setting up a mesh network of energy metering devices : No. 2021610042 : application 11.01.2021 : publ. 19.01.2021 / Sh. Kh. Shikhaliev, I. A. Magomedov; applicant Daghestan State Technical University. – EDN DIURDO. [In Russ]
19. Certificate of state registration of the computer program No. 2020660378 Russian Federation. Software of the system for determining the parameters of the mesh network : No. 2020619053 : application 13.08.2020 : publ. 02.09.2020 / A. R. Ramazanov, I. A. Magomedov ; applicant Daghestan State Technical University. – EDN BHUHIO. [In Russ]
20. Koskinen, P. Realization of a mesh network with a high range of action / P. Koskinen, K. Tatopolos. *Wireless technologies*. 2007; 2(7): 52-53. – EDN MTGBDX. [In Russ]
21. Lidsky, E. A. Route optimization in cellular communication networks. *Telecommunications*. 2009;10:10-14. – EDN KZETMJ. [In Russ]
22. Patent No. 2468536 C2 Russian Federation, IPC H04W 48/20. Routing in a mesh network : No. 2010112992/07 : application 03.09.2008 : publ. 27.11.2012 / A. Stamoulis, A. Sampath. – EDN SQLZRJ.
23. Magomedov, I. A. Principles of constructing a mesh network of distributed calculators / I. A. Magomedov, M. M. Abdulkadirova, I. B. Biybolatov // Week of Science - 2021 : Collection of materials of the 42nd final scientific and technical conference of teachers, staff, graduate students and students of DSTU, Makhachkala, May 17-22, 2021. Makhachkala: *FORMAT*, 2021; 52-54. – EDN HKWQCZ. [In Russ]
24. Klyuchnikov, V. O. Choosing the optimal routing protocol in wireless sensor data transmission networks / V. O. Klyuchnikov. *Modeling, optimization and information technologies*. 2020; 8(2):29. – DOI 10.26102/2310-6018/2020.29.2.038. – EDN ZAAZHN. [In Russ]
25. Ignatov, R. A. Routing protocols in wireless sensor networks / R. A. Ignatov, V. V. Losev. *APRIORI. Series: Natural and Technical Sciences* 2018;2:10. – EDN YVMXQH. [In Russ]
26. Pham, V. D. Research on the use of the AODV protocol in the LoRa mesh network / V. D. Pham, D. T. Le, R. V. Kirichek // Distributed computer and telecommunication networks: management, computing, communication (DCCN-2020) : proceedings of the XXIII International Scientific Conference, Moscow, September 14-18, 2020 year / under the general editorship of V.M. Vishnevsky, K.E. Samuilova. Moscow: V.A. Trapeznikov Institute of Management Problems of the Russian Academy of Sciences, 2020; 490-498. – DOI 10.25728/dccn.2020.062. – EDN ZUSSUF [In Russ]
27. Pisarchuk, A. S. Analysis of the use of wireless self-organizing networks / A. S. Pisarchuk, D. D. Melnikova. *The World of Science Without Borders*, February 11, 2022, 2022; 314-316. – EDN LZWQRY. [In Russ]
28. Dementieva, A. K. Development of a control system for accounting for energy consumption based on self-organizing wireless networks /A. K. Dementieva, S. V. Elyagin, A. G. Frenkel. *REDS: Telecommunication devices and systems*. 2013; 3(4):331-333. – EDN ZSUAPV. [In Russ]

Сведения об авторах:

Магомедов Иса Алигаджиевич, кандидат технических наук, доцент кафедры управления и информатика в технических системах и вычислительной техники; misa1949@mail.ru

Хидивов Мурад Нурюпашаевич, аспирант кафедры программного обеспечения вычислительной техники и автоматизированных систем; mhidivov@gmail.com

Магомедов Алигаджи Исаевич, аспирант кафедры программного обеспечения вычислительной техники и автоматизированных систем, AG_Magomedov94@mail.ru

Information about authors:

Isa A. Magomedov, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof.; Department of Control and Informatics in Technical Systems and Computer Engineering; misa1949@mail.ru

Murad N. Khidivov, Post-graduate Student, Department of Computer Science and Automated Systems Software; mhidivov@gmail.com

Aligadzhi I. Magomedov, Post-graduate Student, Department of Software Engineering and Automated Systems, AG_Magomedov94@mail.ru, n-guseinova@mail.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 12.12.2022.

Одобрена после рецензирования/ Revised 30.01.2023.

Принята в печать/Accepted for publication 30.01.2023.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 004.03:658.5

DOI: 10.21822/2073-6185-2023-50-1-99-113

Оригинальная статья /Original Paper

**Проблемы информационно-технологического обеспечения реализации
BIM-концепции**

Л.И. Малявкина, А.Г. Савина, Д.А. Савин

Среднерусский институт управления – филиал Российской академии народного хозяйства
и государственной службы при Президенте РФ,
302028, г. Орел, ул. Октябрьская, 12, Россия

Резюме. Цель. Цель исследования – анализ текущего уровня развития цифровой инфраструктуры градостроительной сферы, выявление особенностей информационно-технологического обеспечения реализации BIM-концепции на этапах жизненного цикла ОКС и функционала, представленных на национальном рынке решений, поддерживающих BIM-технологии. **Метод.** В рамках проведенного исследования были использованы методы логического, структурного, сравнительного, системного анализа; моделирования и графического представления результатов. **Результат.** Установлено, что в текущий период большинство компаний российской архитектурно-строительной отрасли рассматривают переход к полностью интегрированному BIM как долгосрочному формату развития. Объективным препятствием быстрого перехода выступают сложности комплексного ИТ-обеспечения BIM-процессов и уровень текущего развития цифровой инфраструктуры. Установлено, что приоритетным направлением развития ИТ-индустрии в контексте обеспечения реализации BIM-концепции является формирование единой экосистемы российского программного обеспечения BIM. Наряду с потребностью в разработке конкурентоспособных российских программных продуктов, в качестве основных проблем выделены обеспечение их интероперабельности и стандартизация форматов обмена данными. Определены ключевые параметры отнесения программного продукта к группе BIM, идентифицировать уровни зрелости процесса обмена BIM-данными и рассмотреть подходы к организации обменных процессов. **Вывод.** Предложенные критерии отнесения программных продуктов к решениям, поддерживающим BIM-концепцию, могут применяться при формировании функциональных требований к разрабатываемым импортонезависимым программным продуктам. Интерпретация эталонной модели интероперабельности применительно к BIM-технологии может быть использована для развития интеграционных возможностей BIM-инструментов в единой информационно-технологической среде общих данных, а также стать методологической основой для создания открытого национального стандарта обмена данными.

Ключевые слова: технология информационного моделирования (ТИМ) – Building Information Modeling (BIM), программное обеспечение, интегрируемость, интероперабельность, обмен данными, стандарт обмена данными, среда общих данных

Для цитирования: Л.И. Малявкина, А.Г. Савина, Д.А. Савин. Проблемы информационно-технологического обеспечения реализации BIM-концепции. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023; 50(1):99-113. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-1-99-113

Problems of information technology support for implementation BIM concepts

L.I. Malyavkina, A.G. Savina, D.A. Savin

Central Russian Institute of Management - a branch of the Russian Academy of National Economy and Public Administration under the President of the Russian Federation,
12 Oktyabrskaya St., Orel 302028, Russia

Abstract. Objective. The purpose of the study is to analyze the current level of development of the digital infrastructure of the urban planning sector, to identify the features of information technology support for the implementation of the BIM concept at the stages of the life cycle of the CCS and the functionality presented on the national market of solutions that support BIM technology. **Method.** Within the framework of the study, the methods of logical, structural, comparative, system analysis were used; modeling and graphical presentation of results. **Result.** It has been established that in the current period, most companies in the Russian architecture and construction industry are considering the transition to a fully integrated BIM as a long-term development format. An objective obstacle to a quick transition is the complexity of complex IT support for BIM processes and the level of current development of digital infrastructure. It has been established that the priority direction for the development of the IT industry in the context of ensuring the implementation of the BIM concept is the formation of a single ecosystem of Russian BIM software. Along with the need to develop competitive Russian software products, ensuring their interoperability and standardization of data exchange formats are highlighted as the main problems. The key parameters for assigning a software product to the BIM group are determined, the levels of maturity of the BIM data exchange process are identified, and approaches to the organization of exchange processes are considered. **Conclusion.** The proposed criteria for classifying software products as solutions that support the BIM concept can be used in the formation of functional requirements for the developed import-independent software products. The interpretation of the interoperability reference model in relation to BIM technology can be used to develop the integration capabilities of BIM tools in a single information technology environment of general data, and also become a methodological basis for creating an open national data exchange standard.

Keywords: building information modeling (BIM) technology, software, integrability, interoperability, data exchange, data exchange standard, common data environment

For citation: L.I. Malyavkina, A.G. Savina, D.A. Savin. Problems of information technology support for implementation BIM concepts. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science. 2023; 50(1):99-113. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-1-99-113

Введение. Установленные на государственном уровне сроки обязательного внедрения BIM-технологии в практику деятельности предприятий архитектурно-строительной отрасли неоднократно отодвигались вследствие недостаточного уровня развития информационно-технологической инфраструктуры, способной обеспечить полноценную реализацию технологии. В этой связи актуальным является исследование существующих барьеров и определение основных направлений их преодоления.

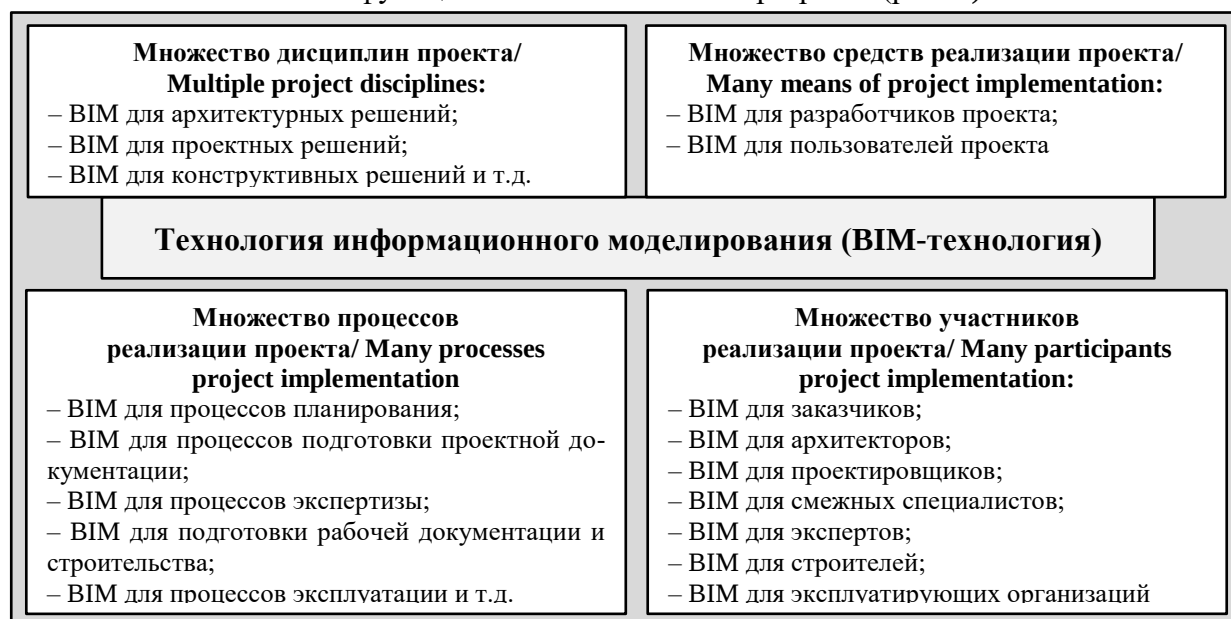
Постановка задачи. Задачи исследования: идентификация критериев отнесения программных продуктов к BIM-решениям, интерпретация эталонной модели интероперабельности применительно к BIM-технологии, исследование подходов к организации обмена BIM-данными в единой цифровой среде.

Методы исследования. В рамках проведенного исследования были использованы методы логического, структурного, сравнительного, системного анализа; моделирования и графического представления результатов.

Обсуждение результатов. По историческим меркам внедрение технологии информационного моделирования в мировую архитектурно-строительную практику в настоящее время находится на начальной стадии [1, 2]. Объективным препятствием достижения заложенных в BIM-концепции стратегических целей является низкий уровень зрелости ее информационно-технологического обеспечения. Анализ определенных BIM-концепцией процессов информационного моделирования по всей цепочке создания ОКС от стадии проектирования до реконструкции и демонтажа позволяет сделать вывод о том, что технологии работы с информационной моделью определяются не только спецификой и содержанием самого проекта, а зависят, прежде всего, от уровня развития инструментальной цифровой инфраструктуры. Деятельность специалистов, использующих в профессиональ-

ной работе BIM-технологии, ограничена рамками функциональных возможностей, которые им предоставляют специализированные программные продукты.

Эффективное использование BIM-технологии, полноценно реализующей современную концепцию информационного моделирования, требует разработки комплексных решений, обеспечивающих создание единой электронно-вычислительной коммуникационной среды для коллективной работы, управления изменениями на всех этапах жизненного цикла ОКС, доступа к внешним источникам информации, информационным системам и ресурсам [3, 4]. С другой стороны, специфика градостроительной деятельности определяет необходимость интегрированного внедрения BIM-технологии с одновременным охватом нескольких функциональных областей и разрезов (рис. 1).



**Рис. 1. Функциональные области внедрения BIM-технологии
в градостроительной деятельности***

Fig. 1. Functional areas for the implementation of BIM technology in urban planning

*Составлено авторами

Это в свою очередь обуславливает сложности реализации комплексного ИТ-обеспечения всех процессов информационного моделирования. Текущий уровень развития ИТ-сферы не позволяет предприятиям архитектурно-строительной сферы ориентироваться только на одно решение и закрыть его функционалом все поставленные задачи.

В этой связи для автоматизации рабочих процессов, формирования и ведения информационной модели ОКС компании, как правило, используют различные программные продукты и технические средства. В результате формируется смешанная ИТ-инфраструктура на основе использования различных информационных систем, предназначенных для решения конкретных задач [5]. Многообразие ИТ-решений порождает проблему обеспечения взаимодействия между ними. Перед участниками инвестиционно-строительной деятельности и поставщиками услуг стоит задача не только оптимального подбора инструментов под конкретные проекты и этапы их реализации, но и сочетания разнородных BIM-продуктов в рамках каждой организации. Кроме того, такой сценарий реализации BIM-концепции не позволяет организовать совместную параллельную работу с единой информационной моделью, а дает возможность использовать только технологию «связанных моделей», при которой разработанные в рамках различных специальностей отдельные модели посредством внешних ссылок собираются в один продукт – 3D-модель здания (сооружения). При этом цифровая модель в настоящее время не имеет самостоятельного значения, а используется исключительно в качестве источника формирования различных видов документации. Однако, в соответствии с BIM-концепцией, информаци-

онная модель представляет собой не просто 3D-модель как совокупность структурированных инженерно-технических и инженерно-технологических данных об объекте строительства. Она является, прежде всего, инструментом управления архитектурной, инженерно-конструкторской, технологической, экономической и иной информацией об ОКС на всех этапах его жизненного цикла [6- 8].

В этой связи ключевая проблема цифровизации отрасли состоит не только в автоматизации отдельных процессов, а в переходе к управлению структурированными данными в единой информационной среде на основе цифровых платформенных программно-технических комплексов и отраслевых цифровых платформ обмена информацией. Следует отметить, что на отечественном ИТ-рынке представлено много разнообразных программных продуктов различных разработчиков, поддерживающих BIM-технологию. При этом абсолютного решения, позволяющего выполнить полный цикл информационного моделирования, нет ни у западных, ни российских вендоров. На текущий момент BIM-инструменты закрывают всего 5-7 разделов, что составляет не более 50% [9] от всей выпускаемой документации (табл. 1).

Таблица 1. Функциональность программных продуктов по разделам этапов жизненного цикла ОКС*

Table 1. The functionality of software products by sections of the stages of the life cycle of the OKS

Разработчик	Программный продукт	Код	Концепция/предпроект	Проектирование	Экспертиза	Строительство	Планирование/Управление проектом	Совместная работа
Autodesk	Advance Steel	5						
	BIM 360	7, 8						
	Civil 3D	1, 6						
	Infraworks	1						
	Navisworks	7, 8						
	Revit	2-6						
	Autodesk Vault	—						
Renga software	Renga Architecture	3						
	Renga Structure	4,5						
	Renga MEP	7						
+ООО 1С»	1С: BIM 6D	3-6						
ООО «1С-Софт»	1С: РМ Управление проектами	8						
ООО «Нано-софтразработка»	nanoCAD инженерный BIM	6						
АО «Си-софт Девелопмент»	Специализированные инженерно-технологические программные комплексы по автоматизации проектно-изыскательских работ	3-6						
Microsoft	Microsoft Project	8						
Oracle	Primavera	8						
Allplan	Allplan Architecture	3						
	Allplan Engineering	4						

1– инфраструктура, 2 – технология, 3 – архитектура, 4 – конструкции железобетонные, 5 – конструкции металлические, 6 – инженерные коммуникации, 7 – координация, 8 – строительство/ 1 - infrastructure, 2 - technology, 3 - architecture, 4 - reinforced concrete structures, 5 - metal structures, 6 - engineering communications, 7 - coordination, 8 - construction

* Составлено авторами

Несмотря на достаточно высокий уровень появляющихся на российском рынке

отечественных разработок, их функционал значительно уступает зарубежным программным продуктам, обеспечивающим реализацию технологии информационного моделирования. Исторически сложилось, что наиболее функциональным инструментом создания и ведения информационной модели считается линейка продуктов американской компании Autodesk. Являясь крупнейшим поставщиком программного обеспечения для гражданского и промышленного строительства, компания Autodesk разработала целую серию прикладных решений (Autodesk Vaut, Navisworks, Buzzsaw, Revit, Revit Server), предоставляющих возможность работы в единой модели, совместного управления данными моделей разных дисциплин на всех уровнях проекта, управления процессами изменений на протяжении всего жизненного цикла ОКС [10].

Однако указанные программные продукты также не лишены недостатков. К примеру, Autodesk Revit позиционируется как решение, реализующее комплексный подход на основе единой информационной модели. Действительно, создаваемая в нем модель может использоваться конструкторами и инженерами без существенных конвертаций и преобразований. Однако полученная единая модель имеет проблемы настройки инструментов и размерности, сложности детальной проработки на стадии рабочего документирования. Кроме того, инженерная составляющая прикладного решения уступает специализированному программному обеспечению, а формат RVT, в котором сохраняется модель, не позволяет работать с RVT-файлами другим прикладным решениям.

Несмотря на это, данному вендору удалось выстроить целые экосистемы внутри отечественных предприятий градостроительной сферы. Вместе с тем, произошедшие в 2022 г. глобальные изменения (экономическая турбулентность, вызванные санкционными ограничениями приостановка деятельности или полный уход с национального рынка иностранных ИТ-компаний) неизбежно приведут к изменению ИТ-ландшафта и тектоническим сдвигам в корпоративной бизнес-архитектуре российских компаний. Постепенно зарубежные программные продукты будут замещаться российскими аналогами, и ИТ-инфраструктура будет выстраиваться исключительно на импортонезависимых решениях. Скорость процессов импортозамещения, а также эффективность развития российского ИТ-сектора в области информационного моделирования будет определяться верно расставленными приоритетами. На данный момент на рынке уже представлен ряд BIM-решений отечественных разработчиков для российских пользователей. Большая работа в этой области проделана компанией «Аскон» (с 2016 г. – Renga Software), развивающей с 2012 г. российскую BIM-систему Renga, содержащую модули и инструменты по проектированию архитектурных решений, разработке несущих конструкций и внутренних инженерных сетей зданий в единой программе. Несмотря на то, что система автоматизированного проектирования зданий позиционируется как максимально приближенная к российским стандартам оформления проектной рабочей документации, полного соответствия российскому законодательству разработчикам достичь не удалось и по функциональным характеристикам система пока является слабым конкурентом зарубежному аналогу.

Следует отметить, что до настоящего времени процесс разработки программного обеспечения, реализующего технологию информационного моделирования, происходил бессистемно. Каждый российский вендор стремился разработать прикладное решение под конкретного заказчика, в результате внедряемые программные продукты носили характер единичных разработок, закрывающих отдельные разделы информационного моделирования. Со временем в сегменте создания программно-аппаратного обеспечения технологии информационного моделирования стали появляться компании-интеграторы, осуществляющие разработку и внедрение пакетных типовых программных решений для различных стадий жизненного цикла объектов строительства. Усиление внимания со стороны государства к цифровой трансформации градостроительной сферы [11, 12] обусловило смену парадигмы развития ИТ-индустрии для достижения целей масштабной реализации BIM-концепции. Основной целью стало формирование единой развитой экосистемы российского программного обеспечения технологии информационного моделирования.

В рамках достижения поставленной цели наиболее актуальным является решение нескольких задач:

1. Разработка конкурентоспособных российских программных продуктов и обеспечение технологического суверенитета посредством выстраивания ИТ-инфраструктуры предприятий градостроительной сферы на импортонезависимых ИТ-решениях [13].
2. Обеспечение интегрируемости, интероперабельности, композируемости программного обеспечения посредством использования платформенного подхода [14].
3. Разработка унифицированных правил хранения и использования ВІМ-данных, автоматизация процессов их миграции на основе стандартизации форматов обмена.

Проведенный в процессе исследования анализ предлагаемых профессиональным сообществом вариантов решения поставленных задач, позволил выделить ключевые направления, на которых следует сфокусировать внимание для эффективного достижения поставленной цели.

Запущенные механизмы государственной поддержки реализации ВІМ-концепции в градостроительной сфере РФ привели к появлению специализированных ассоциаций и экспертных площадок, объединивших представителей профессиональных сообществ по разработке теоретико-методологических основ и нормативно-правовой базы внедрения технологии информационного моделирования, предприятий-лидеров стройиндустрии и ключевых разработчиков программного обеспечения российского ИТ-сектора.

Результатом их совместной работы в области формирования единой экосистемы российского программного обеспечения стали: представленная в сентябре 2021 г. на сайте Национального объединения изыскателей и проектировщиков (НОПРИЗ) итоговая версия одобренного членами профессионального сообщества и рекомендованного к применению электронного справочника программных продуктов, предназначенных для цифровизации проектно-изыскательской деятельности [15]; одобренный 19.04.2022 г.

Национальным объединением организаций в сфере технологий информационного моделирования (НОТИМ) перечень «отечественного программного обеспечения, доступного для формирования и ведения информационной модели объекта капитального строительства в соответствии с законодательством Российской Федерации» [16].

Каждый из указанных документов содержит минимально необходимую информацию по более, чем 100 программным продуктам, в той или иной мере являющихся аналогами зарубежного программного обеспечения, а именно: краткое описание функционала и области применения, сведения о разработчике, наличии регистрации в Реестре Российского программного обеспечения.

Особую ценность данные этих систематизированных каталогов представляют для заинтересованных пользователей, находящихся на этапе принятия решения о внедрении ВІМ, поскольку позволяют в едином реестре осуществлять поиск и подбор требуемых прикладных продуктов. Однако более глубокий анализ еще раз подтверждает неготовность российской ИТ-сферы обеспечить в текущий момент времени полномасштабное внедрение ВІМ-технологии на уровне всей строительной отрасли.

Так, анализ рекомендованных к применению программных продуктов в разрезе их разработчиков свидетельствует о том, что существующая на рынке конкуренция российских вендоров обуславливает не синхронизированный процесс, направленный на достижение общей цели, а параллельную работу над созданием, по сути, разрозненных, дублирующих друг друга ВІМ-инструментов, автоматизирующих лишь отдельные фрагменты работы с информационной моделью. Что же касается оценки их текущей функциональности на каждом из этапов информационного моделирования ОКС в его современном концептуальном представлении, то можно отметить следующее:

- набор цифровых инструментальных средств для реализации ВІМ-технологии на этапах территориального планирования и обоснования инвестиций достаточный, а прикладные решения для обеспечения инженерно- геологических и инженерно-

геотехнических изысканий практически отсутствуют;

- этап выполнения проектных работ, подготовки проектной и рабочей документации является одним из самых наполненных с точки зрения предлагаемого к использованию BIM-инструментария;
- формально в каталоге присутствуют программные продукты и для реализации технологии на этапе строительства объекта. Однако в перечне практически не представлены расчетные комплексы, а также инструменты, позволяющие оценить качество информационной модели и обеспечить своевременное выявление коллизий;
- в перечне отсутствуют программные комплексы, предназначенные именно для управления строительными процессами на основе информационной модели ОКС.

Таким образом, для эффективного решения проблемы информационно-технологического обеспечения внедрения BIM-технологии и полноценной реализации BIM-концепции необходимо не только организовать разработку недостающего программного обеспечения для определенных этапов формирования и ведения информационной модели. Требуется нивелировать конкуренцию в среде российских разработчиков, сформировать совместное пространство разработки, которое позволит не просто синхронизировать процессы разработки, но и перейти к полноценным пилотным проектам создания и внедрения единых инструментальных средств и программных комплексов, покрывающих все информационные циклы BIM-модели, обеспечить их взаимную интеграцию и скоординированное развитие.

В этой связи в качестве одного из актуальных направлений исследований следует рассматривать решение проблемы четких формулировок функциональных требований к разрабатываемым программным продуктам, правил отнесения ИТ-решений к группе BIM, а также критериев проверки их функционала на соответствие BIM-применимости.

Существовавший достаточно длительное время стереотип, ассоциирующий BIM-технологии с трехмерным моделированием, привел к тому, что в качестве основного атрибута отнесения программного приложения к BIM-инструментам стала возможность реализации технологий работы с трехмерным графическим инструментарием.

Однако дальнейшее эволюционное развитие концепции информационного моделирования привело к кардинальному переосмыслению, как ключевой задачи самой технологии, так и назначения ИТ-обеспечения BIM-процессов. Количество измерений перестало выступать в качестве определяющего атрибута.

Акцент с создания 3D-модели сместился на обеспечение процессов управления актуальными данными об ОКС в цифровом формате на всех стадиях его жизненного цикла в едином информационно-технологическом пространстве. Это, в свою очередь, обусловило значительное расширение набора ключевых параметров, позволяющих отнести программный продукт к классу BIM (рис. 2).

Для полноценной реализации технологии информационного моделирования современные BIM-решения должны совместить в себе среду моделирования и пространство эффективной координации архитектурно-строительной информации, обеспечивая весь комплекс задач по управлению информационной моделью.

Являясь развитием узкоспециализированных систем автоматизированного проектирования, современные BIM-инструменты, наряду с предъявляемым требованием поддержки универсального трехмерного параметрического моделирования должны содержать библиотеки типовых многоуровневых и компонентных BIM-объектов, регулярно пополняемые посредством включения уникальных компонентов новых информационных моделей.

При этом подготовка данных для формирования информационной модели должна быть реализована на основании классификатора строительной информации (КСИ). Но все же главная роль при разработке комплексных BIM-продуктов должна отводиться развитию интеграционных возможностей приложений и механизмов достижения определенного уровня интероперабельности. Оба этих параметра являются тесно взаимосвязанными.

Поддержка универсального трехмерного параметрического моделирования			
Наличие библиотеки BIM-объектов		Поддержка возможности использования КСИ	
Наличие инструментов обмена данными		Поддержка специализированных и открытых форматов обмена данными	
Использование внешних баз данных		Возможность работы с ИМ в облачных или распределенных сетях	
Масштабируемость	Производительность	Мультипользовательская среда	Интуитивно понятный, дружелюбный GUI-интерфейс

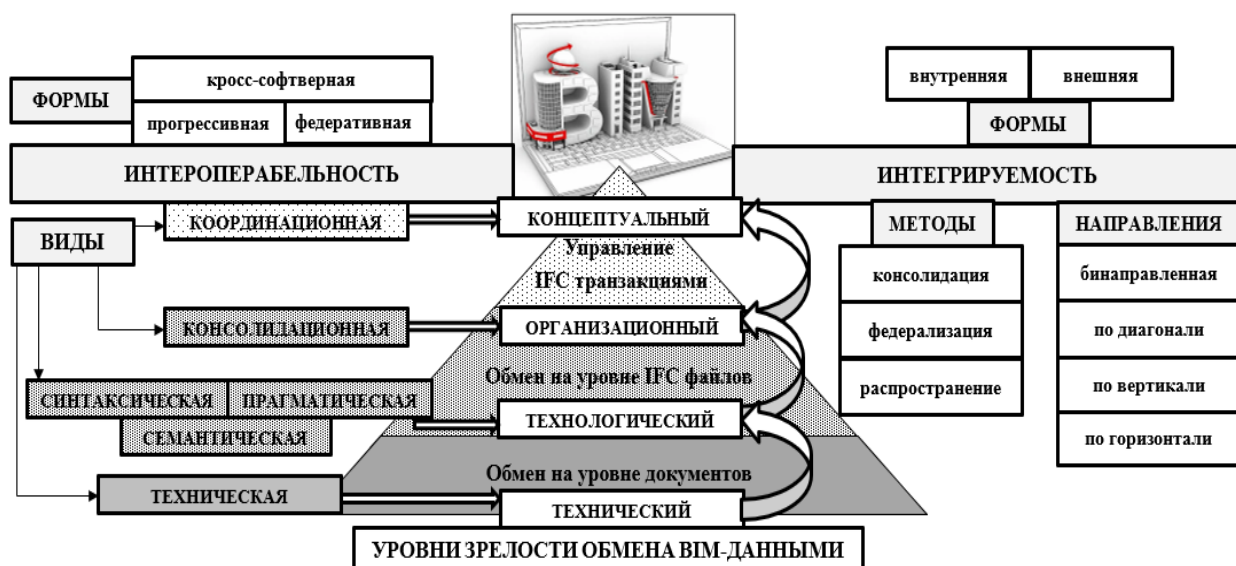


Рис. 2. Ключевые параметры отнесения программного продукта к BIM-решениям*
Fig. 2. Key parameters for classifying a software product as a BIM solution

* Составлено авторами

Если взять за основу сущность понятия «интероперабельность» как «способность двух или более систем или компонентов к обмену информацией и к использованию информации, полученной в результате обмена» [17], а интеграцию рассматривать как реализацию «интероперабельности в определенный момент времени, т.е. состояние, соответствующее моменту времени, в который системы взаимосвязаны так, чтобы обеспечить получение решения» [17], то совместная их реализация позволит решить задачу организации эффективного обмена BIM-данными.

При этом под обменом BIM-данными следует понимать не только файловую передачу информационных моделей или их компонентов, но и их совместное использование.

Выделенные в эталонной модели уровни развития интероперабельности можно интерпретировать применительно к BIM-технологии, условно сопоставив их с уровнями зрелости обменных процессов (табл. 2): от технического, предполагающего обмен на уровне документов, через технологический и организационный (обмен на уровне файлов в стандартных и открытых форматах) к верхнему концептуальному уровню, предусматривающему управление IFC-транзакциями.

Реализация различных форм интероперабельности должна гарантировать возможность хранения и последующего использования данных типовых информационных моделей вне зависимости от программного продукта (BIM-системы), в котором осуществлялась его разработка.

Так, если рассматривать интероперабельность BIM-продуктов в аспекте их прогрессивного развития, то все новые релизы BIM-решений должны поддерживать возможность работы с файлами, созданными в ранних версиях. Кроме того, если программное обеспечение утрачивает свою актуальность и больше не используется для разработки информационных моделей, либо принимается решение о переходе на BIM-инструменты другого вендора, то имеющиеся BIM-объекты должны открываться в новых прикладных решениях (кросс-софтверная интероперабельность).

Таблица 2. Характеристика уровней зрелости процесса обмена BIM-данными*
Table. 2. Characteristics of maturity levels of the BIM data exchange process *

Уровень интероперабельности Level interoperability	Вид интероперабельности View interoperability	Характеристика Characteristic	Интерпретация применительно к BIM Interpretation in relation to BIM	Уровень зрелости обменных процессов The level of maturity of metabolic processes	Характеристика Characteristic	
0	-	отсутствие взаимодействия между системами	отсутствие взаимодействия между компонентами BIM-системы	0	—	—
1	техническая (физическая)	способность к обмену сигналами и данными	способность к обмену данными в файловом формате	I – технический	обмен на уровне файлов	планирование технических вопросов, связанных с сопряжением систем и их сервисов
2	синтаксическая	способность к обмену данными	способность к обмену данными, представленными в общем формате	II – технологический	обмен на уровне файлов в открытом формате IFC	точное значение совместно используемой информации, которое сохраняется на всех итерациях информационного обмена и равнозначно понимается всеми участниками
3	семантическая	способность к обмену информацией	способность системы обрабатывать информацию, поступающую из внешних источников, корректно интерпретировать передаваемую информацию			
4	прагматическая	способность совместного использования информации в контексте решаемой задачи	способность взаимодействующих систем учитывать контекст используемой информации			
5	консолидационная (динамическая)	способность к совместному использованию информации с учетом изменяющихся условий функционирования	способность систем учитывать эффект передачи информации и изменения состояния друг друга	III – организационный	согласованное функционирование на основе обмена элементами BIM-моделей	согласованные обменные процессы, при выполнении которых достигаются согласованные цели
6	координационная	способность к совместному использованию информации в условиях согласования допущений и ограничений	полная совместимость на основе реализации единой модели информации и процессов взаимодействия	IV – концептуальный	управление IFC транзакциями	обмен BIM-моделями в единой цифровой среде

*Составлено авторами с использованием [17]

Федеративная интероперабельность предполагает возможность объединения в единую модель элементов, разработанных с использованием различных программных продуктов, и формирования ведомостей геометрических или регламентных коллизий. Если рассматривать интеграцию с точки зрения факта совершения интероперабельного обменного процесса, то в качестве ее характеристик целесообразно выделить следующие: формы проявления (внутренние и внешние); методы реализации (консолидация, федерализация, распространение); направления взаимодействия (бинаправленная, по горизонтали, по вертикали, по диагонали).

К примеру, если анализировать внутреннюю интеграцию BIM-решений на стадии проектирования, то интеграция «по горизонтали» будет означать охват всех частей и этапов строительного проектирования с гарантией согласованной передачи данных по технологической цепочке между дисциплинами проекта (архитектура, конструкции, и т.д.). Вертикальное направление предполагает согласованную передачу данных по технологической цепочке производственного процесса (проектирование, изготовление, монтаж и т.д.). Интеграция «по диагонали» – обмен информацией с другими системами (например, передача данных из графических САД-систем в расчетные САЕ). Реализация свойства бинаправленности на этапе проектирования подразумевает, что результаты расчетов выгружаются в моделирующую систему с дальнейшим обновлением исходной модели.

Ключевой проблемой формирования экосистемы отечественного программного обеспечения технологии информационного моделирования является организация управления существенно неоднородными структурированными BIM-данными, которые должны верно интерпретироваться, обрабатываться входящими в состав экосистемы приложениями и мигрировать между ними без коллизий, обеспечивая должный уровень интероперабельности и интегрируемости. Поскольку на данный момент формирование цифровых компонентов информационной модели ведется в мультиинструментальной среде, включающей целый ряд различных программных продуктов, то возникает необходимость автоматизированной сборки единой консолидированной BIM-модели и ее экспертизы с точки зрения согласованности содержащейся в ней информации, взаимодействия разделов. Для получения интегрированной информационной модели и коллективной работы с ней, а также в целях организации информационного взаимодействия участников инвестиционно-строительного процесса, обеспечения их оперативного доступа к актуальной, достоверной, согласованной информации разработку и ведение информационной модели предполагается осуществлять в единой информационно-технологической среде общих данных (СОД) [18].

Концепция построения единой среды находится в стадии формирования, но ее основные структурные элементы, определяемые логикой BIM-процессов в рамках отдельной информационной модели, уже выделены и заложены в систему государственных стандартов [19, 20] (рис. 3). Поскольку BIM-философия охватывает весь жизненный цикл объекта капитального строительства, то создание программно-технических комплексов среды общих данных, обеспечивающих эффективное управление итеративным процессом разработки и использования информационной модели всеми участниками инвестиционно-строительной деятельности целесообразно вести на основе платформенных решений, обеспечивающих, как горизонтальную, так и вертикальную интеграцию BIM-систем. Прикладные цифровые платформы субъектов градостроительной деятельности при реализации платформенного подхода будут выступать в роли агрегаторов информационных потоков цифрового документооборота значительного числа участников. Посредством технологических интерфейсов информационные системы участников будут подключены к отраслевой цифровой платформе, предназначенной для накопления, обмена и управления BIM-данными в структурированном виде. Разработка цифровых платформ станет технологической основой для интеграции и перехода на цифровые форматы обмена данными в единой информационно-телекоммуникационной среде.

1. Раздел рабочих данных (Work-in-progress) Пространство хранения текущих (незавершенных) моделей. Информация доступна только в рамках целевой группы	2. Раздел общих данных (Shared) Материалы, утвержденные руководителем целевой группы и используемые участниками проекта (в рамках одной или смежных профессиональных дисциплин) для координации проекта, анализа текущего состояния информационной модели и ее дальнейшей разработки Размещенные в разделе исходные файлы изменить нельзя	2.1 Клиентская часть раздела общих данных (Client Shared) Информация для координации работ с субподрядчиками
Среда общих данных (СОД)		
3. Раздел опубликованных данных (Published) Утвержденные, согласованные между участниками проекта материалы, готовые для передачи авторизованным внешним пользователям, не являющимся членами команды проекта	4. Раздел архивных данных (Archive) Полный набор данных информационной модели, размещаемый в архиве после его согласования и аннулирования в публичном разделе Редактирование данных не допускается, корректировка – только путем создания новой версии файла на основе копии из архивного раздела	

Рис. 3. Структура среды общих данных по ГОСТ Р 10.0.01-2018[20]
Fig. 3. The structure of the general data environment according to GOST R 10.0.01-2018[20]

На данный момент интеграционные возможности BIM-инструментов растут, причем стремление к полноценному воплощению BIM-концепции требует развития технологий взаимодействия не только внутри BIM-системы, но и интеграции с корпоративными информационными системами, расчетными программными комплексами, системами визуализации и т.д. (рис. 4).

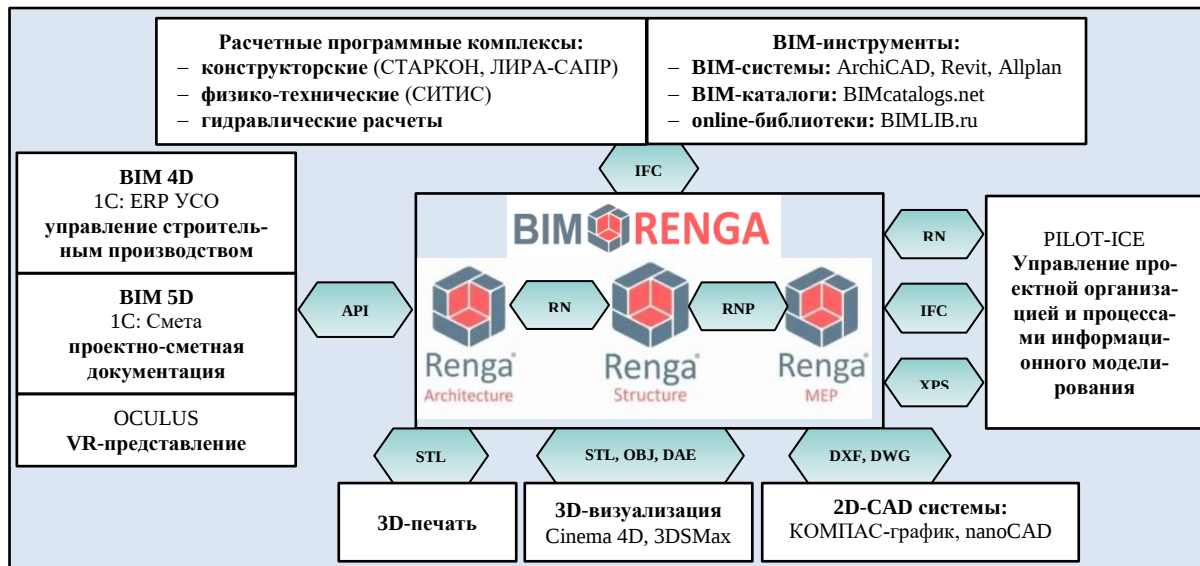


Рис. 4. Взаимодействие инструментов реализации технологии информационного моделирования в BIM-системе Renga

Fig. 4. Interaction of tools for implementing information modeling technology in the Renga BIM system

При этом многообразие программных продуктов, используемых при обмене данными в процессе информационного моделирования, порождает проблему множественности форматов, в которых представляются цифровые компоненты модели и сопровождающая их формирование документация.

На текущий момент для обеспечения интеграции BIM-инструментов рассматривается возможность применения прямых трансляторов от производителя программного обеспечения (API), стандартных форматов передачи геометрии (DWG, DXF, STL, DFF,

STP), промышленных форматов обмена (IFC, DSTV, KISS и др.), а также формата обмена данными через интернет (XML). Подход к организации обмена данными на основе собственных форматов разработчиков используется на ранних уровнях зрелости технологии информационного моделирования. Его нельзя признать рациональным, поскольку генерируемая в специальных «сборочных» программах федерированная модель (federated model) представляет собой набор отдельных элементов, полученных в разнородных программах со своими форматами файлов. При этом компоненты общей модели не взаимодействуют друг с другом, и изменения одного из них не приводит к автоматическому изменению связанных с ним элементов.

Более высокий уровень развития обменных процессов основан на концепции Open BIM, предполагающей использование открытого подхода к информационному моделированию. Сущность концепции заключается в формировании единой интегрированной модели (integrated model) из взаимосвязанных компонентов, построенных на базе различных решений, но сохраненных в едином открытом формате.

Это позволяет организовать стандартизированный обмен данными и обеспечить не просто взаимодействие между программными пакетами, но и совместимость на уровне рабочих процессов. В настоящее время существует порядка десяти форматов открытого обмена данными, но в качестве наиболее приемлемого варианта для реализации концепции Open BIM в градостроительной деятельности признан международный открытый универсальный стандарт IFC (Industry Foundation Classes). Разработанный еще в 1995 г. и являющийся совместным продуктом архитектурно-конструкторских фирм и производителей программного обеспечения многих стран, формат IFC продолжает развиваться и совершенствоваться.

В основе концепции его построения лежит информационная схема архитектурно-строительной и смежных отраслей, формально специализированная на языке объектно-ориентированного моделирования данных EXPRESS. Данные, определяемые IFC-схемой, могут представляться разными форматами (например, SPF, XML, JSON PDF) и храниться под управлением реляционных и объектно-ориентированных СУБД. Формат позволяет помимо трехмерной геометрии передавать атрибутивную информацию, в результате чего поддержка формата IFC является одним из признаков отнесения программного продукта к BIM-решениям.

Практика поддержки формата ведущими мировыми вендорами стала основанием для его принятия в Российской Федерации в 2018 г. в качестве государственного. Однако, существенные риски использования международного открытого стандарта обмена данными, связанные с обеспечением информационной безопасности, а также высокая вероятность запрета на его использование со стороны правообладателя в условиях санкционных ограничений, обусловили потребность разработки национального аналога стандарта IFC. Качественно разработанный национальный стандарт должен обеспечить обмен, хранение и безопасность данных на всех этапах жизненного цикла ОКС и соответствовать ключевым функциональным требованиям: поддерживать концепцию 7D-моделирования; предусматривать синтаксические и семантические конструкции; быть независимым от программных платформ и языков реализации; поддерживать совместимость с классификатором строительной информации и форматом IFC.

Решение поставленных задач в процессе разработки российского стандарта требует колоссальных интеллектуальных усилий, финансовых и временных затрат, в том числе по причине недостаточно развитой теоретико-методологической базы BIM-концепции, теории открытых данных и обмена информацией. Профессиональное сообщество рассматривает три возможных подхода к созданию открытого национального стандарта обмена [21]:

– подход А – национальный стандарт – дополнительное соглашение к международному стандарту IFC, уточнение существующей концептуальной информационной схемы IFC с учетом национальных регуляций и правил (в этом случае российское ПО – часть международной экосистемы);

– подход В – основа национального стандарта обмена BIM-данными – новая концептуальная информационная схема. При этом гармонизация с международным стандартом IFC остается ключевым требованием, поэтому российское ПО способно взаимодействовать с иностранным на основе IFC;

– подход С – российский стандарт обмена данными разрабатывается исключительно на основе конкретных национальных требований без учета концептуализации и формализации стандарта IFC.

В настоящее время разработка национального стандарта является предметом дискуссий специалистов. При этом каждый из рассмотренных подходов имеет своих сторонников и противников. Одни считают разработку российского аналога нецелесообразной вследствие высоких затрат, другие считают эти затраты оправданными. Но все они сходятся во мнении, что использование открытого стандарта позволит обеспечить требования связанности данных, сквозную идентификацию формируемых в процессе выполнения строительных проектов информационных моделей. Стандарт не только позволит перейти на единую платформу, единые термины, понятия, но и развивать в этом направлении соответствующее программное обеспечение, что, в свою очередь, позволит добиться главной цели – сформировать единую систему информационно-технологического обеспечения технологии информационного моделирования.

Вывод. Проведенное исследование подтвердило необходимость формирования единой экосистемы отечественного программного обеспечения для эффективного внедрения и использования BIM-технологии на всех этапах жизненного цикла ОКС. В рамках исследования идентифицированы ключевые параметры отнесения программных продуктов к BIM-системам, рассмотрены подходы к решению проблемы обеспечения должного уровня интероперабельности и интегрируемости программных продуктов класса BIM, а также варианты разработки унифицированных правил хранения и процессов миграции BIM-данных в рамках единой цифровой инфраструктуры на основе стандартизации форматов обмена.

Библиографический список:

1. Smith P. BIM Implementation – Global Strategies. *Procedia Engineering*. 2014; 85: 482–492.
2. Appraisal of emergence of building information modeling (BIM) and blockchain technologies in construction industry / A. Awali, H.A. H. Ahmed, B.N. A.Almasni [et al.]. *Экономика строительства*. 2022; 2(74): 108–119.
3. Manzoor, B., Othman, I., Gardezi, S.S.S., Altan, H., Abdalla S.B. BIM-Based Research Framework for Sustainable Building Projects: A Strategy for Mitigating BIM Implementation Barriers. *Applied sciences (Switzerland)*. 2021; 11. 12: 5397.
4. Da Silva, T.F.L., Arroteia, A.V., Melhado, S.B., De Carvalho M.M., Vieira, D.R. Exploring the influence of risks in BIM implementation: a review exploring BIM critical success factors and BIM implementation phases. *Journal of modern project management*. 2021; 8. 3: 125–135.
5. Канев В.В. Опыт применения технологий информационного моделирования для анализа архитектурно-конструктивных решений зданий / В.В. Канев, Д.В. Лаптев // *Инновации. Наука. Образование*. 2020. № 21. С. 1147–1152.
6. Смирнов Д. Информационный BIM-менеджмент в соответствии с ISO 19650 // *Путевой навигатор*. 2022. № 50(76). С. 24–29.
7. Ковалев В.В. К вопросу применения технологии информационного моделирования на всех этапах жизненного цикла зданий и сооружений // *Актуальные проблемы военно-научных исследований*. 2022. № S2(22). С. 202–207.
8. Bogdanov, A., Zaitsev, V., Khalitova, K. (2021). Application of BIM-technologies during the construction and operation of buildings and structures // *E3S Web of Conferences Volume 274 (2021). 2nd International Scientific Conference on Socio-Technical Construction and Civil Engineering (STCCE - 2021)*. France, 2021. P. 6009.
9. Инструмент для развития // *Рязанские ведомости*. 2022. №18(6023) / [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://rv-ryazan.ru/instrument-dlya-razvitiya/>
10. Баклушина И. В. Особенности использования технологии информационного моделирования (BIM-технологии) на примере программного обеспечения Revit / И.В. Баклушина, А. В. Усова, А. В. Бойкова // *Тенденции развития науки и образования*. 2020. № 62-5. С. 80–83.

11. Об утверждении стратегического направления в области цифровой трансформации строительной отрасли, городского и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации до 2030 года. Распоряжение Правительства РФ от 27.12.2021 № 3883-р / [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/727688538>
12. Ovsianikova, T.Yu. Building information modelling systems: strategic objectives and realities of digital transformation in construction / T.Yu. Ovsianikova, A.A. Patsukov. *Real Estate: Economics, Management*. 2022; 1: 13-18.
13. Проблема 01.01.02: BIM и русский софт // Строительство.ru. Всероссийский отраслевой интернет-журнал / [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://stroimprosto-msk.ru/publications/belyj-bim/>
14. BIM-стандарт организации Версия 1.0 Allplan 2017 / [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://allbau-software.de/phocadownload/BIM%20-%20standart%201.0.pdf>
15. Электронный справочник программных продуктов, предназначенных для цифровизации проектно-исследовательской деятельности / [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://tim.nopriz.ru/programms>
16. Перечень отечественного программного обеспечения, доступного для формирования и ведения информационной модели объекта капитального строительства в соответствии с законодательством Российской Федерации / [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://docs.yandex.ru/docs/view?url=ya-browser%3A%2F%2F4DT1uXEPPrJRXLUFoewruNwKpcFBjOTHiQwBcCbU1viZMZ8iLpaghYQkHUTs74x-TnvTVxL0DdsQ5X2uvUVueix2nAyoaabeIwjz1LqDUSAiez8mup-MmOTS9XanxBztYwa6iR9r7DN1uVHiHIIIMeg%3D%3D%3Fsign%3DN0as72P5oOI6Veyef8hFJfkEty456Uq2e0Pl3jFyys0E%3D&name=1647195128_Perechen_otechestvennogo_programmnogo_obespecheniya_-_versiya_3.docx&nosw=1
17. Батоврин В.К., Гуляев Ю.В., Олейников А.Я. Обеспечение интероперабельности – основная тенденция в развитии открытых систем // Информационные технологии и вычислительные системы. 2009. № 5. С. 7-15
18. Савина А.Г., Малявкина Л.И., Савин Д.А. Информационно-технологическое обеспечение формирования единой цифровой среды взаимодействия в градостроительной сфере // Образование и наука без границ: фундаментальные и прикладные исследования. 2022. № 15. С. 60-65.
19. ГОСТ Р 10.0.04-2019/ ИСО 29481-2:201. Стандарты информационного моделирования зданий и сооружений. Информационное моделирование в строительстве. Справочник по обмену информацией. Часть 2. Структура взаимодействия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/t/1200164872>
20. ГОСТ Р 10.0.00-2018 Система стандартов информационного моделирования зданий и сооружений. Основные положения. Общие требования к технологии информационного моделирования. / [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://nghp-sro.ru/files/news/news358/Appendix%201.pdf>
21. Манифест национального стандарта. Открытый формат обмена ТИМ данными / [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://ancb.ru/files/ck/1644400375_Manifest_standarta_obmena_TIM_dannymi.pdf

References:

1. Smith, P. BIM Implementation – Global Strategies. *Procedia Engineering*. 2014; 85: 482–492.
2. Appraisal of emergence of building information modeling (BIM) and blockchain technologies in construction industry. / A. Awali, H.A. H. Ahmed, B.N. A. Almasni [et al.]. *Construction economics*. 2022; 2(74): 108-119. (In Russ)
3. Manzoor, B., Othman, I., Gardezi, S.S.S., Altan, H., Abdalla S.B. (2021). BIM-Based Research Framework for Sustainable Building Projects: A Strategy for Mitigating BIM Implementation Barriers // *Applied sciences (Switzerland)*. 11. 12. 5397.
4. Da Silva, T.F.L., Arroteia, A.V., Melhado, S.B., De Carvalho M.M., Vieira, D.R. (2021). Exploring the influence of risks in BIM implementation: a review exploring BIM critical success factors and BIM implementation phases. *Journal of modern project management*. 2021; 8. 3: 125-135.
5. Kanev, V.V. Experience of using information modeling technologies for the analysis of architectural and structural solutions of buildings / V.V. Kanev, D.V. Laptev. *Innovations. The science. Education*. 2020; 21: 1147-1152 (In Russ)
6. Smirnov, D. Information BIM management in accordance with ISO 19650. *Travel navigator*. 2022; 50(76): 24-29. (In Russ)
7. Kovalev, V.V. On the issue of the application of information modeling technology at all stages of the life cycle of buildings and structures. *Actual problems of military scientific research*. 2022; S2(22): 202-207. (In Russ)
8. Bogdanov, A., Zaitsev, V., Khalitova, K. Application of BIM-technologies during the construction and operation of buildings and structures // *E3S Web of Conferences Volume 274 (2021). 2nd International Scientific Conference on Socio-Technical Construction and Civil Engineering (STCCE - 2021)*. France. 6009.
9. A tool for development. *Ryazan Vedomosti*. 2022; 18(6023) / [Electronic resource]. Access mode: <https://ryazan.ru/instrument-dlya-razvitiya/>. (In Russ)

10. Baklushina, I.V. Features of using information modeling technology (BIM technology) on the example of Revit software / I.V. Baklushina, A.V. Usova, A.V. Boikova. *Trends in the development of science and education*. 2020; 62-5: 80-83. (In Russ)
11. On the approval of the strategic direction in the field of digital transformation of the construction industry, urban and housing and communal services of the Russian Federation until 2030. Decree of the Government of the Russian Federation No. 3883-r dated 27.12.2021 / [Electronic resource]. Access mode: <https://docs.cntd.ru/document/727688538>. (In Russ)
12. Ovsianikova, T.Yu. Building information modelling systems: strategic objectives and realities of digital transformation in construction / T.Yu. Ovsianikova, A.A. Patsukov. *Real Estate: Economics, Management*. 2022; 1: 13-18. (In Russ)
13. The problem 01.01.02: BIM and Russian software. *Construction.ru*. All-Russian industry online magazine / [Electronic resource]. Access mode: <https://stroimprosto-msk.ru/publications/belyj-bim/>. (In Russ)
14. BIM-standard of the organization Version 1.0 Allplan 2017 / [Electronic resource]. Access mode: <https://allbau-software.de/phocadownload/BIM%20-%20standart%201.0.pdf>. (In Russ)
15. Electronic directory of software products intended for digitalization of design and survey activities / [Electronic resource]. Access mode: <http://tim.nopriz.ru/programms>. (In Russ)
16. The list of domestic software available for forming and maintaining an information model of a capital construction object in accordance with the legislation of the Russian Federation / [Electronic resource]. Access mode: https://docs.yandex.ru/docs/view?url=ya-browser%3A%2F%2F4DT1uXEPRrJRXLUFoewruNwKpcFBjOTHiQwBcCbU1viZMZ8iLpaghYQkHUTs74x-TnvTVxL0DdsQ5X2uvUVueix2nAyoaabeIwz1LqDUSAiez8mup-MmOTS9XanxBztYwa6iR9r7DN1uVHiHIMeg%3D%3D%3Fsign%3DN0as72P5oOI6Veyf8hFJfkEty456Uq2e0Pl3jFyys0E%3D&name=1647195128_Perechen_otechestvennogo_programmnogo_obespecheniya_-_versiya_3.docx&nosw=1. (In Russ)
17. Batovrin V.K., Gulyaev Yu.V., Oleinikov A.Ya. Ensuring interoperability is the main trend in the development of open systems. *Information technologies and computing systems*. 2009; 5: 7-15. (In Russ)
18. Savina A.G., Malyavkina L.I., Savin D.A. Information and technological support for the formation of a unified digital environment of interaction in the urban planning sphere. *Education and science without borders: fundamental and applied research*. 2022; 15: 60-65. (In Russ)
19. GOST R 10.0.04-2019/ ISO 29481-2:201. Standards of information modeling of buildings and structures. Information modeling in construction. Information exchange guide. Part 2. Structure of interaction / [Electronic resource]. – Access mode: <https://docs.cntd.ru/document/t/1200164872> (In Russ)
20. GOST R 10.0.00-2018 System of standards for information modeling of buildings and structures. The main provisions. General requirements for information modeling technology / [Electronic resource]. Access mode: <http://nghp-sro.ru/files/news/news358/Appendix%201.pdf>. (In Russ)
21. Manifesto of the national standard. Open format of TIM data exchange / [Electronic resource]. Access mode: http://ancb.ru/files/ck/1644400375_Manifest_standarta_obmena_TIM_dannymi.pdf. (In Russ)

Сведения об авторах:

Малыавкина Людмила Ивановна, доктор экономических наук, профессор кафедры математики и информационных технологий; ludamal20@yandex.ru, ORCID 0000-0001-9079-5684

Савина Анна Геннадьевна, кандидат педагогических наук, доцент кафедры математики и информационных технологий; angen1976@mail.ru, ORCID 0000-0002-2295-4695

Савин Денис Алексеевич, аспирант кафедры технологии, сервиса, торгового и таможенного дела; denalsavin@yandex.ru, ORCID 0000-0001-9390-6597

Information about authors:

Lyudmila I. Malyavkina, Dr. Sci. (Economic), Prof., Department of Mathematics and Information Technology; ludamal20@yandex.ru, ORCID 0000-0001-9079-5684

Anna G. Savina, Cand. Sci. (Pedagogic), Assoc. Prof., Department of Mathematics and Information Technology; angen1976@mail.ru, ORCID 0000-0002-2295-4695

Denis A. Savin, Postgraduate Student, Department of Technologies, Service, Trade and Customs Business; denalsavin@yandex.ru, ORCID 0000-0001-9390-6597

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 05.02.2023.

Одобрена после рецензирования/ Revised 26.02.2023.

Принята в печать/Accepted for publication 26.02.2023.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 004.056

DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-1-114-122

Оригинальная статья/Original Paper

Разработка программно-технического решения для выявления трендов спроса на товары

**А.И. Мифтахова¹, Э.И. Янгиров¹, Е.И. Карасева¹, А.И. Янгиров²,
Е.Ю. Никулина³, И.Г. Дровникова³**

¹Университет ИТМО,

¹197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский проспект, д.49, лит. А, Россия,

²ФКУ «НИЦ «Охрана» Росгвардии,

²111539, г. Москва, Реутовская, 12Б, Россия,

³Воронежский институт МВД России,

³394065, г. Воронеж, пр. Патриотов, 53, Россия

Резюме. Цель. Целью исследовательской работы является разработка программно-го решения для выявления трендов спроса на потребительские товары путем анализа больших данных. **Методы.** Для достижения поставленной цели в работе было проанализировано текущее состояние развития рынка интернет-ритейла в России, а также рассмотрены технологии и инструменты анализа больших данных, необходимые для проектирования программно-технического решения. Для оценки эффективности полученной модели обработки данных применяется выборка, полученная из открытых источников. **Результат.** В результате исследования разработано техническое решение, позволяющее анализировать спрос на товары в заданном временном диапазоне на основе данных из открытых источников. **Вывод.** Разработан программный компонент, позволяющий анализировать спрос на потребительские товары на основе данных о заказах. Полученное техническое решение поддерживает пакетную обработку данных, а архитектура инфраструктурного компонента позволяет вести вычисления распределенно. Тестирование инструмента на реальной выборке показало эффективность такого подхода к анализу трендов потребительского спроса.

Ключевые слова: большие данные, спрос, тренд, естественный язык, программный компонент

Для цитирования: А.И. Мифтахова, Э.И. Янгиров, Е.И. Карасева, А.И. Янгиров, Е.Ю. Никулина, И.Г. Дровникова Разработка программно-технического решения для выявления трендов спроса на товары. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023; 50(1):114-122. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-1-114-122

Development of a software and hardware solution to identify trends in demand for goods

**A.I.Miftakhova¹, E.I.Yangirov¹, E.I.Karaseva¹, A.I.Yangirov², E.Yu.Nikulina³,
I.G. Drovnikova³,**

¹ITMO University,

¹49, lit. A, Kronverksky Ave., St. Petersburg 197101, Russia,

²FKU "Research Center "Protection" of the Russian Guard,

²12B Reutovskaya Str., Moscow 111539, Russia,

³Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia,

³53 Patriotov Ave., Voronezh 394065, Russia

Abstract. Objective. The aim of the research work is to develop a software solution for identifying trends in demand for consumer goods by analyzing big data. **Method.** To achieve this goal, the work analyzed the current state of development of the Internet retail market in Rus-

sia, as well as the technologies and tools for analyzing big data necessary for designing a software and hardware solution. To evaluate the effectiveness of the obtained data processing model, a sample obtained from open sources is used. **Result.** As a result of the study, a technical solution has been developed that allows analyzing the demand for goods in a given time range based on data from open sources. **Conclusion.** A software component has been developed to analyze the demand for consumer goods based on order data. The resulting technical solution supports batch processing of data, and the architecture of the infrastructure component allows distributed computing. Testing the tool on a real sample showed the effectiveness of this approach to analyzing consumer demand trends.

Keywords: big data, demand, trend, natural language, software component

For citation: A.I. Miftakhova, E.I. Yangirov, E.I. Karaseva, A.I. Yangirov, E.Yu. Nikulina, I.G. Drovnikova. Development of a software and hardware solution to identify trends in demand for goods. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science. 2023; 50(1):114-122. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-1-114-122

Введение. Выявление трендов спроса на товары играет ключевую роль в анализе продаж, помогает планировать закупки, актуализировать ассортимент, корректировать алгоритмы ценообразования и т.п. Существует множество способов выявления трендов, и один из них предполагает работу с большими массивами информации. Обычно они представляют собой потоки неструктурированных или слабоструктурированных данных и поступают в количествах, обработка которых невозможна обычными средствами.

Использование больших данных позволяет маркетологам компании получать достоверную информацию о текущем состоянии и тенденциях развития бизнеса, изучать поведение основных конкурентов, выявлять предпочтения своих клиентов.

Все это позволяет компании достигнуть конкретных результатов [1]: увеличение продаж; выявление наиболее популярных товаров и услуг; повышение качества обслуживания клиентов; уменьшение расходов и повышение рентабельности бизнеса; предупреждение мошенничества; удержание клиентов.

Постановка задачи. Целью исследования является разработка программного решения для выявления трендов спроса на потребительские товары путем анализа больших данных.

Методы исследования. В данном исследовании применяются следующие методы:

- 1) Анализ состояния рынка онлайн-торговли в России;
- 2) Выбор архитектуры для построения систем обработки больших данных;
- 3) Разработка программной части технического решения поставленной проблемы;
- 4) Проверка работоспособности полученного решения на основе больших данных (датасета), содержащего тестовые данные для анализа.

Обсуждение результатов. Анализ состояния рынка интернет-ритейла в России. Ситуация на рынке интернет-ритейла в России за последние годы претерпела сильные изменения. Пандемия COVID-19 спровоцировала бурный рост продаж, совершаемых в сети.

Объем рынка интернет-торговли в России за 2021 г. вырос на 52% и составил 4,1 трлн. руб., что следует из отчета аналитической компании Data Insight [2]. Число заказов выросло более чем вдвое - до 1,7 млрд., средний чек одной покупки снизился на 26% до 2400 руб., что представлено на рис. 1.

Снижение размера среднего чека связано с превращением онлайн-заказов в повседневную практику, опережающим ростом универсальных маркетплейсов с низким средним чеком, а также с ростом продаж в сегменте продуктов питания и смещением потребительского поведения в сторону небольших импульсных покупок с быстрой доставкой. Статистика данного показателя по годам представлена на рис. 2.

В целом доля электронной торговли на российском рынке ритейла за прошлый год увеличилась на 3 пп. и составила 12%.



Рис.1. Динамика количества заказов в онлайн-магазинах России с 2011 по 2021 гг.

Fig. 1. Dynamics of the number of orders in online stores in Russia from 2011 to 2021

Таким образом, рынок интернет-ритейла в России переживает бурный рост, что, несомненно, вызовет высокий уровень конкуренции в данной среде.

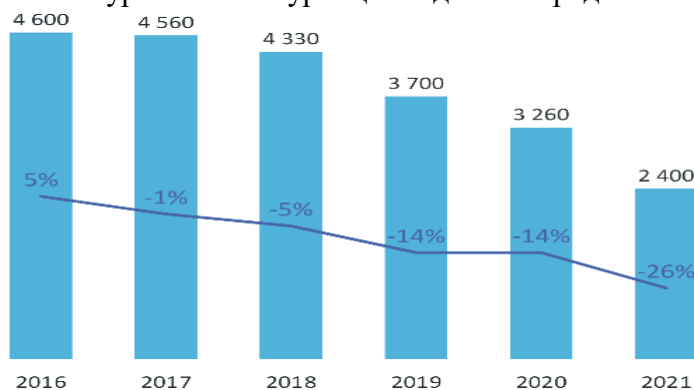


Рис.2. Динамика среднего чека покупок в онлайн-магазинах с 2016 по 2021 гг.

Fig. 2. Dynamics of the average check of purchases in online stores from 2016 to 2021

Следовательно, рост конкуренции на рынке интернет-товаров, в свою очередь обуславливает необходимость качественного анализа ситуации на данном рынке.

Разработка программно-технического решения для выявления трендов спроса на товары. Указанный выше анализ обосновывает необходимость создания специального инструмента выявления трендов спроса на потребительские товары. В рамках данного исследования были проведены разработка и тестирование программно-технического решения для анализа больших данных о потребительском спросе на рынке интернет-ритейла.

Одним из классических подходов к построению систем обработки больших данных (далее Big Data) является так называемая лямбда-архитектура [3]. Это концепция, согласно которой обработка информации происходит на двух основных уровнях:

1. Пакетный, на котором все входящие данные хранятся в необработанном виде, а затем обрабатываются в пакетном режиме. Обычно пакетный уровень представлен озерами больших данных (Data Lake) на базе Apache Hadoop [4]. В рамках данной статьи будет рассмотрена реализация именно этого способа обработки данных.

2. Поточковый, отвечающий за обработку информации в режиме реального времени. Этот уровень обеспечивает минимальную задержку передачи данных, но за счет снижения точности обработки данных [5].

Кроме того, выделяют также сервисный уровень (или уровень обслуживания), который индексирует пакеты и обрабатывает результаты вычислений, происходящих на пакетном уровне. Поточковый уровень обновляет уровень обслуживания, отправляя ему дополнительную информацию с учетом последних данных. Преимуществами лямбда-архитектуры являются отказоустойчивость и масштабируемость [6]. Благодаря функциям пакетного и потокового уровней можно добавлять новые данные в основное хранилище, обеспечивая при этом сохранность существующих данных. В связи с этим лямбда-

архитектура широко используется на практике во многих Big Data проектах, в частности, в Twitter, Netflix и Yahoo [7]. Устройство лямбда-архитектуры представлено на рис. 3.

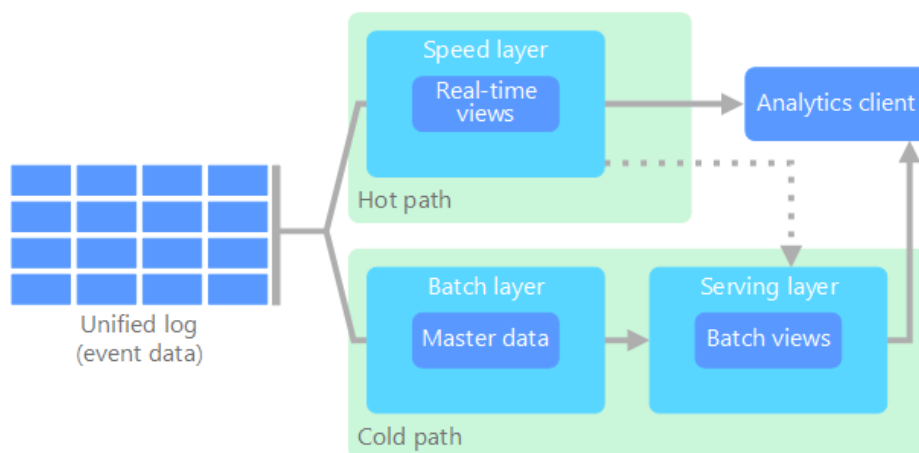


Рис. 3. Устройство лямбда-архитектуры

Fig. 3. Lambda architecture device

Реализация пакетного уровня обработки данных требует построения эффективной системы распределенного хранения и параллельных вычислений. В ходе изучения существующих решений для анализа больших данных такая архитектура зарекомендовала себя как наиболее отказоустойчивая и удобная для горизонтального масштабирования [8].

Данный подход предполагает использование следующих инструментов:

1. Apache Spark. Мастер Apache Spark обрабатывает входящие запросы от клиента (Jupyter Notebook), распределяет рабочие нагрузки и отслеживает ресурсы в нодах. Рабочие узлы выполняют работу, для которой они были выделены, и возвращают результат мастеру.

2. Для целей хранения данных предполагается интеграция с Apache Hadoop. Мастер в кластере Hadoop – это диспетчер ресурсов, который распределяет рабочую нагрузку по узлам кластера. NodeManager получает инструкции от ResourceManager и распределяет ресурсы, доступные на одном узле. Узлы данных отвечают за обслуживание запросов на чтение и запись.

3. Docker – программное обеспечение для автоматизации развёртывания и управления приложениями в средах с поддержкой контейнеризации, которое позволяет «упаковать» приложение со всем его окружением и зависимостями в контейнер [9].

4. В качестве клиентской части планируется использование Jupyter Notebook. Это среда разработки, располагающая широким функционалом для решения задач анализа данных и машинного обучения. Она позволяет разбить код на фрагменты и работать над ними в произвольном порядке – писать и проверять функции, загружать файлы в память и обрабатывать содержимое.

В качестве основного инструмента разработки программно-технического решения был выбран язык программирования Python. Он является наиболее популярным инструментом для анализа данных и машинного обучения [10]. Кроме того, данный язык обладает простым синтаксисом и позволяет разработчику сконцентрироваться на решении задачи, не вынуждая вдаваться в детали реализации.

Разработка указанного выше решения включает в себя создание так называемого пайплайна – документа, визуализирующего процесс разработки программно-технического продукта. Пайплайн обработки данных состоит из следующих этапов:

1. Стемминг – процесс сокращения слова до своей грамматической основы [11]. В качестве инструмента для проведения стемминга использовался модуль Snowball Stemmer библиотеки NLTK [12].

2. Удаление стоп-слов из всех исследуемых документов (так называемого корпуса документа) удаляются знаки препинания, числа, а также слова, не несущие смысловой нагрузки (предлоги, местоимения, союзы, междометия и пр.)

3. Токенизация – разбиение каждого документа в корпусе на токены-термы. В качестве токенизатора был использован модуль `RegexTokenizer` из библиотеки `NLTK` [13].

4. Преобразование корпуса документов в матрицу TF-IDF. Это статистическая мера, используемая для оценки значимости термина в рамках документа, где TF – это отношение числа вхождений заданного слова в документ к общему количеству слов в нем, а IDF – это инверсия частоты встречаемости слова в рамках всего корпуса текстов. Учет IDF позволяет снизить вес слов, которые являются широко используемыми в рамках исследуемого массива данных. Таким образом, в рамках этого метода больший вес получают слова с высокой частотой употреблений в рамках одного документа и низкой – в рамках всего корпуса.

5. Кластеризация – процесс разбиения массива данных, представленного в векторном формате, на совокупность относительно однородных подмножеств [14]. Для реализации этого этапа был выбран алгоритм кластеризации, известный как метод k-средних. В частности, использована его реализация, представленная модулем `KMeans` в библиотеке `scikit-learn` [15].

6. Результаты кластеризации сохраняются в файл для обеспечения дальнейшего переиспользования без необходимости проводить повторные вычисления.

7. К размеченному на кластеры массиву применяется метод главных компонент (*principal component analysis*) из модуля `RCA` библиотеки `Scikit-learn`. Данный алгоритм призван уменьшить размерность входных данных, потеряв при этом наименьшее количество информации [16]. В рамках этой задачи производится сжатие массива векторов длины N до размерности 2. Этот этап необходим для визуализации и интерпретации результатов работы.

8. Для анализа смысловой нагрузки кластеров для каждого подмножества подбирается 10 слов, обладающих наиболее высоким значением TF-IDF. Таким образом, каждый кластер получает словесное описание, соответствующее общему смыслу входящих в него документов [17].

9. Полученные результаты выводятся на экран в виде точечной диаграммы. Для визуализации используется библиотека `seaborn` [18].

Обобщенную структуру пайплайна можно представить в виде, представленном на рис. 4.



Рис. 4. Пайплайн обработки входных данных

Fig.4. Input data processing pipeline

Тестирование программного компонента решения. В качестве датасета были использованы данные о заказах в онлайн-магазине одежды бренда H&M за период с 2019 – 2020 гг. [19]. Он содержит дату покупки и текстовое описание товара. Оригинальная вы-

борка содержит примерно 32 млн. записей. Массив данных записан в файл формата «*.parquet», обеспечивающий более эффективное с точки зрения занимаемого пространства хранение данных, чем стандартный формат «*.csv» [20].

Ниже представлен пример тестовых данных (рис. 5). В качестве первой тестовой выборки был выбран период с 01.12.2019 г. по 15.12.2019 г. Результаты анализа представлены на рис. 6.

	detail_desc	t_dat
1	Headband in a soft knit containing some wool with a draped detail at the front. Width approx. 1	2019-12-01
2	Fitted, padded jacket in woven fabric with a zip down the front and lined hood with a detachabl	2019-12-01
3	Boxy-style jumper in a soft, fine knit containing some wool with low dropped shoulders, long sl	2019-12-01
4	Short-sleeved cotton jersey top in a relaxed fit with a slightly wider neckline and a rounded her	2019-12-01
5	Belt in grained imitation leather with a large, patterned metal buckle. Width approx. 2.5 cm.	2019-12-01
6	Pyjama bottoms in lightweight fabric with an elasticated drawstring waist and tapered legs with	2019-12-01
7	Jumper in a soft, fine knit containing some wool with long sleeves, decorative metal buttons or	2019-12-01
8	Jacket in soft pile with a collar and zip down the front. Long raglan sleeves, pockets in the side	2019-12-01
9	Hoop earrings in metal decorated with pearly plastic beads. Length 6 cm.	2019-12-01
10	Set with a bra and thong briefs in satin with lace details. Soft, non-wired bra with triangular cup	2019-12-01
11	Sleeveless top in a viscose weave with a V-neck, adjustable spaghetti straps and embroidery	2019-12-01
12	Joggers in soft jersey with wide elastication at the waist, side pockets and tapered legs.	2019-12-01
13	V-neck jumper in fine-knit cotton with ribbing around the neckline, cuffs and hem.	2019-12-01
14	Ankle-length trousers in twill made from a cotton blend. High paper bag waist with pleats and a	2019-12-01
15	Trousers in jersey with a high waist, concealed zip in one side and straight, wide legs with sew	2019-12-01
16	Short, thin metal chain necklace with leaf-shaped pendants. Adjustable length, 40-48 cm.	2019-12-01
17	Earrings with a round embossed metal disc and pearly pendants. Length 4.5 cm.	2019-12-01

Рис. 5. Фрагмент тестовых данных
Fig. 5. Test data snippet

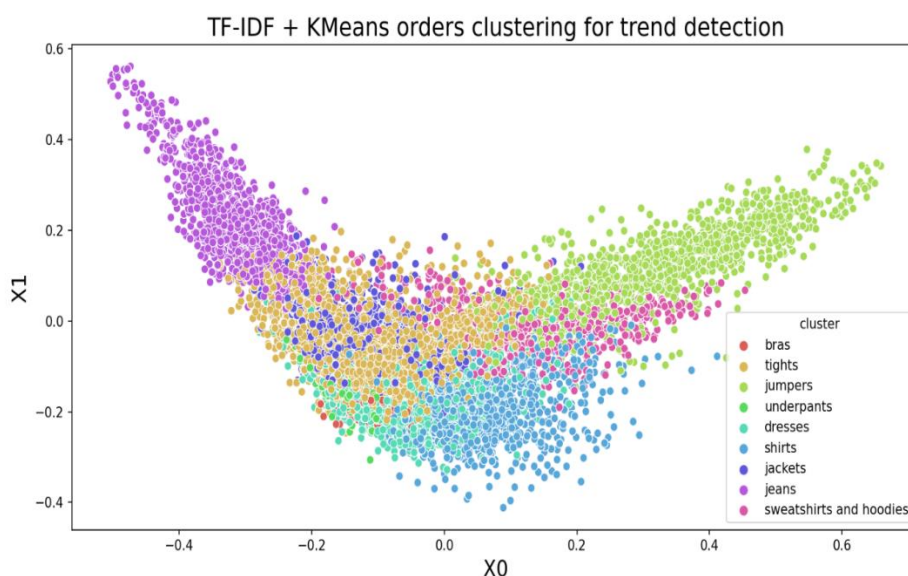


Рис. 6. Визуализация результатов обработки данных о заказах с 01.12.2019 г. по 15.12.2019 г.
Fig. 6. Visualization of the results of order data processing from 12/01/2019 to 12/15/2019

На графике, представленном на рис. 6, наиболее ярко выделяются кластеры заказов, содержащих свитеры, джинсы и колготки, что соответствует ожиданиям от покупок в зимний период. Можно отметить, что предметы одежды, выполняющие аналогичную функцию, сгруппированы по соседним кластерам (свитеры и худи).

Данный факт связан с тем, что описания данных товаров состоят из схожих наборов слов. Однако этим же можно объяснить и, на первый взгляд, необычные паттерны. Например, кластеры заказов, содержащих колготки и куртки, на графике практически смешиваются. Дело в том, что оба этих предмета одежды предназначены для утепления и могут быть описаны соответствующим набором слов (“warm”, “soft”, “thick”, “tight” и пр.). Для сравнения был рассмотрен летний период продолжительностью в 15 дней с 01.07.2019 г. по 15.07.2019 г. (рис. 7). Как видно из рис. 7, состав кластеров изменялся (появились, купальники и исчез кластер курток).

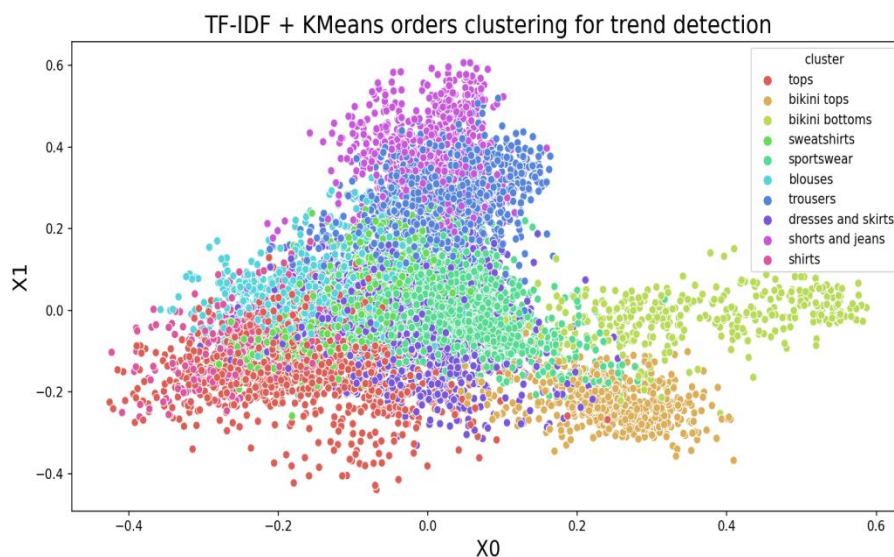


Рис. 7. Визуализация результатов обработки данных о заказах с 01.07.2019 г. по 15.07.2019 г.
Fig. 7. Visualization of the results of order data processing from 07/01/2019 to 07/15/2019

Очевидный интерес у покупателей вызывают пляжная одежда, шорты, джинсы, а также спортивная одежда, что также является ожидаемым потребительским поведением для летнего сезона.

Вывод. В рамках данного исследования был разработано программно-техническое решение, позволяющее анализировать спрос на потребительские товары на основе данных о заказах. Предложенное решение основано на пакетной обработке данных, а архитектура инфраструктурного компонента позволяет вести вычисления распределенно. Тестирование разработанного решения на реальной выборке показало эффективность такого подхода к анализу трендов потребительского спроса.

В качестве возможных задач для дальнейшей работы над данной темой могут быть выделены следующие:

- 1) Изучение инструментов для повышения точности и детальности определения трендов спроса на товары;
- 2) Реализация потокового модуля предложенной в исследовании лямбда-архитектуры;
- 3) Прогнозирование спроса на товары в заданной перспективе.

Библиографический список:

1. Величко, Н. А. Технология Big Data. Анализ рынка Big Data / Н. А. Величко, И. П. Митрейкин // Синергия Наук. – 2018. – № 30. – С. 937-943.
2. Черненко, О. С. Применение TF-IDF алгоритма в рекомендательных системах государственных закупок / О. С. Черненко // Мир компьютерных технологий: Сборник статей студенческой научно-технической конференции, Севастополь, 04–07 апреля 2017 года / Научный редактор Е.Н. Машенко. – Севастополь: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Севастопольский государственный университет", 2017. – С. 66-67.
3. Леонтьева, С. А. Кластеризация изображений методом "k-средних" / С. А. Леонтьева, А. Ю. Демин // Молодежь и современные информационные технологии: Сборник трудов XVI Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 03–07 декабря 2018 года/Томский политехнический университет. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2019. – С. 86-87.
4. Прохоренков, П. А. Современные информационные технологии маркетинга / П. А. Прохоренков, О. М. Гусарова, Т. В. Аверьянова // Фундаментальные исследования. – 2018. – № 12-1. – С. 158-162.
5. Маркетинговое исследование Интернет-торговля в России 2021 // Data Insight URL: https://datainsight.ru/eCommerce_2021 (дата обращения: 19.09.2022).
6. Kiran M. et al. Lambda architecture for cost-effective batch and speed big data processing //2015 IEEE International Conference on Big Data (Big Data). – IEEE, 2015. – С. 2785-2792.
7. Panwar A., Bhatnagar V. Data lake architecture: a new repository for data engineer //International Journal of Organizational and Collective Intelligence (IJOICI). – 2020. – Т. 10. – №. 1. – С. 63-75.

8. Григорьев Ю. А., Ермаков О. Ю. Обработка запросов в системе с лямбда-архитектурой на уровне ускорения // Информатика и системы управления. – 2020. – №. 2. – С. 3-16.
9. Матвеева П.Р. Сравнение лямбда и традиционной архитектуры // Форум молодых ученых. – 2018. – №. 1. – С. 734-740.
10. Fernández-Manzano E. P., Neira E., Clares-Gavilán J. Data management in audiovisual business: Netflix as a case study // El profesional de la información (EPI). – 2016. – Т. 25. – №. 4. – С. 568-576.
11. Big Data Solution with Hadoop, Spark, Jupyter and Docker // Medium URL: <https://medium.com/@martinkarlsson.io/big-data-solution-with-hadoopsark-jupyter-and-docker-6763983ed5d8> (дата обращения: 24.09.2022).
12. Козинцев Д. А., Шиян А. А. Контейнеризация для анализа больших данных на примере kubernetes и docker // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2020). – 2020. – С. 393-396.
13. Raschka S., Patterson J., Nolet C. Machine learning in python: Main developments and technology trends in data science, machine learning, and artificial intelligence // Information. – 2020. – Т. 11. – №. 4. – С. 193.
14. Khyani D. et al. An Interpretation of Lemmatization and Stemming in Natural Language Processing // Journal of University of Shanghai for Science and Technology. – 2021.
15. URL: https://www.nltk.org/_modules/nltk/stem/snowball.html (дата обращения: 01.10.2022). Source code for nltk.stem.snowball//NLTK::nltk.stem.snowball
16. URL: https://www.nltk.org/_modules/nltk/tokenize/regexp.html (дата обращения: 01.10.2022). Source code for nltk.tokenize.regexp//NLTK::nltk.tokenize.regexp sklearn.cluster.KMeans // scikit-learn 1.1.2 documentation
17. URL: <https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.cluster.KMeans.html> (дата обращения: 03.10.2022).
18. Granato D. et al. Use of principal component analysis (PCA) and hierarchical cluster analysis (HCA) for multivariate association between bioactive compounds and functional properties in foods: A critical perspective // Trends in Food Science & Technology. – 2018. – Т. 72. – С. 83-90.
19. Text Clustering with TF-IDF in Python // Medium URL: <https://medium.com/mllearning-ai/text-clustering-with-tf-idf-in-pythonc94cd26a31e7> (дата обращения: 29.09.2022).
20. Seaborn: statistical data visualization // Seaborn Documentation URL: <https://seaborn.pydata.org/index.html> (дата обращения: 02.10.2022).
21. H&M Personalized Fashion Recommendations//Kaggle URL: <https://www.kaggle.com/competitions/h-and-m-personalized-fashionrecommendations> (дата обращения: 01.10.2022).
22. Saavedra M. Z. N., Yu W. E. A comparison between text, parquet, and PCAP formats for use in distributed network flow analysis on Hadoop // Journal of Advances in Computer Networks. – 2018. – Т. 5. – №. 2. – С. 59-64.

References:

1. Velichko N. A. Big Data technology. Analysis of the Big Data market/ N. A. Velichko, I. P. Mitreikin. *Synergy of Sciences*. 2018; 30: 937-943.[In Russ]
2. Chernenko O. S. Application of the TF-IDF algorithm in recommendatory public procurement systems-World of Computer Technologies: Collection of articles of the student scientific and technical conference, Sevastopol, April 04–07, 2017 / Scientific editor E .N. Mashchenko. - Sevastopol: Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Sevastopol State University", 2017; 66-67 [In Russ].
3. Leontieva, S. A. Clustering of images by the "k-means" method / S. A. Leontieva, A. Yu. Demin . Youth and modern information technologies: Proceedings of the XVI International scientific and practical conference of students, graduate students and young scientists , Tomsk, December 03–07, 2018 / Tomsk Polytechnic University. *Tomsk: National Research Tomsk Polytechnic University*, 2019; 86-87.[In Russ]
4. Prokhorenkov P. A. Modern information marketing technologies / P. A. Prokhorenkov, O. M. Gusarova, T. V. Averyanova. *Fundamental research*. 2018;12(1): 158-162.[In Russ]
5. Marketing research Internet commerce in Russia 2021. Data Insight URL: https://datainsight.ru/eCommerce_2021 (Accessed 09/19/2022). [In Russ]
6. Kiran M. et al. Lambda architecture for cost-effective batch and speed big data processing //2015 IEEE International Conference on Big Data (Big Data). IEEE, 2015; 2785-2792.
7. Panwar A., Bhatnagar V. Data lake architecture: a new repository for data engineer. *International Journal of Organizational and Collective Intelligence (IJOCI)*. 2020; 10(1): 63-75.
8. Grigoriev Yu. A., Ermakov O. Yu. Processing of requests in a system with lambda architecture at the level of acceleration. *Computer Science and Control Systems*. 2020; 2:3-16.[In Russ]
9. Matveeva P.R. Comparison of lambda and traditional architecture.*Forum of young scientists*. 2018;1: 734-740 [In Russ]
10. Fernández-Manzano E. P., Neira E., Clares-Gavilán J. Data management in audiovisual business: Netflix as a case study. *El profesional de la información (EPI)*. 2016;25(4): 568-576

11. Big Data Solution with Hadoop, Spark, Jupyter and Docker. Medium URL: <https://medium.com/@martinkarlsson.io/big-data-solution-with-hadoopsark-jupyter-and-docker-6763983ed5d8> (Accessed: 09/24/2022)
12. Kozintsev D. A., Shiyani A. A. containerization for big data analysis on the example of kubernetes and docker. *Actual problems of infotelecommunications in science and education (APINO 2020)*. 2020; 393-396. [In Russ]
13. Raschka S., Patterson J., Nolet C. Machine learning in python: Main developments and technology trends in data science, machine learning, and artificial intelligence. *Information*. 2020;11(4):193.
14. Khyani D. et al. An Interpretation of Lemmatization and Stemming in Natural Language Processin. *Journal of University of Shanghai for Science and Technology*. 2021
15. URL: https://www.nltk.org/_modules/nltk/stem/snowball.html (Accessed: 01.10.2022). Source code for nltk.stem.snowball // NLTK:: nltk.stem.snowball
16. URL: https://www.nltk.org/_modules/nltk/tokenize/regexp.html (Accessed: 01.10.2022). Source code for nltk.tokenize.regexp // NLTK:: nltk.tokenize.regexp
17. URL: <https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.cluster.KMeans.html> (Accessed: 03.10.2022). sklearn.cluster.KMeans // scikit-learn 1.1.2 documentation
18. Granato D. et al. Use of principal component analysis (PCA) and hierarchical cluster analysis (HCA) for multivariate association between bioactive compounds and functional properties in foods: A critical perspective. *Trends in Food Science & Technology*. 2018;72:83-90.
19. Text Clustering with TF-IDF in Python // Medium URL: <https://medium.com/mllearning-ai/text-clustering-with-tf-idf-in-pythonc94cd26a31e7> (Accessed: 29.09.2022).
20. Seaborn: statistical data visualization // Seaborn Documentation URL: <https://seaborn.pydata.org/index.html> (Accessed: 02.10.2022).
21. H&M Personalized Fashion Recommendations. Kaggle URL: <https://www.kaggle.com/competitions/h-and-m-personalized-fashionrecommendations> (Accessed: 01.10.2022).
22. Saavedra M. Z. N., Yu W. E. A comparison between text, parquet, and PCAP formats for use in distributed network flow analysis on Hadoop. *Journal of Advances in Computer Networks*. 2018; 5(2): 59-64.

Сведения об авторах:

Мифтахова Альбина Ирековна, студент, факультет инфокоммуникационных технологий; miftakhovaalbina@gmail.com

Янгиров Эмиль Илдарович, студент, факультет инфокоммуникационных технологий; emilyangirov@gmail.com

Карасева Екатерина Ивановна, кандидат экономических наук, доцент, факультета инфокоммуникационных технологий; eikaraseva@itmo.ru,

Янгиров Адиль Илдарович, начальник сектора функциональных испытаний инженерно-технических средств защиты отдела технических экспертиз и функциональных испытаний; adil-yan@yandex.ru

Никулина Екатерина Юрьевна, кандидат технических наук, доцент, кафедра автоматизированных информационных систем ОВД; 5nikeu@mail.ru

Дровникова Ирина Григорьевна, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры автоматизированных информационных систем органов внутренних дел; idrovnikova@mail.ru

Information about the authors:

Albina I. Miftahova, Student; miftakhovaalbina@gmail.com

Emil I. Yangirov, Student; emilyangirov@gmail.com

Ekaterina I. Karaseva, Cand. Sci. (Econom), Assoc. Prof.; eikaraseva@itmo.ru

Adil I. Yangirov, Head of the sector of functional testing of engineering and technical means of protection of the department of technical expertise and functional tests; adil-yan@yandex.ru

Ekaterina Yu. Nikulina, Cand. Sci. (Eng), Assoc. Prof., Department of Automated Information Systems of the Department of Internal Affairs; nikeu@mail.ru

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

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/ Received 23.12.2022.

Одобрена после рецензирования / Reviced 24.01.2023.

Принята в печать /Accepted for publication 24.01.2023.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 519.852

DOI: 10.21822/2073-6185-2023-50-1-123-129

Оригинальная статья/Original Paper

**Вариантное регрессионное моделирование производства электроэнергии
в Российской Федерации**

С.И. Носков¹, Е.С. Попов¹, С.П. Середкин¹, В.В. Тирских¹, В.Д. Торопов²

¹ Иркутский государственный университет путей сообщения,

¹664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15, Россия,

² Байкальский государственный университет,

²664003, г. Иркутск, ул. Ленина, 11, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является построение линейной регрессионной модели производства электроэнергии в Российской Федерации в зависимости от ресурсных показателей, к которым относятся: объем добычи угля и газа, производство мазута. В качестве информационной базы исследования использованы статистические данные за 2005 – 2020 г. г. **Метод.** Оценивание неизвестных параметров модели осуществляется с использованием трех методов – наименьших квадратов, модулей и антиробастного оценивания. Они ведут себя по-разному по отношению к выбросам – наблюдениям, не согласующимся с выборкой данных в целом. Второй из них вообще не реагирует на выбросы, полностью игнорируя их, а третий, напротив, сильно к ним тяготеет, следовательно, эти методы являются своего рода антагонистами друг по отношению к другу. **Результат.** Получены три альтернативных модели линейной регрессионной модели производства электроэнергии, обладающие высокой точностью. Рассчитано значение индекса параметрической стабильности выборки данных, основанного на свойствах методов оценивания параметров. Выделены наблюдения, в максимальной и минимальной степени соответствующие линейной модели на анализируемой выборке. Вычислены значения вкладов факторов в правые части моделей. **Вывод.** Три построенных различными методами варианта модели могут успешно использоваться для решения задач, связанных с прогнозированием производства электроэнергии в стране. При этом вариант, построенный методом наименьших квадратов, является своего рода компромиссным.

Ключевые слова: производство электроэнергии, линейная регрессионная модель, методы наименьших квадратов, модулей, антиробастного оценивания, индекс параметрической однородности, вклады факторов

Для цитирования: С.И. Носков, Е.С. Попов, С.П. Середкин, В.В. Тирских, В.Д. Торопов. Вариантное регрессионное моделирование производства электроэнергии в Российской Федерации. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023; 50(1):123-129. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-1-123-129

Variant regression modeling of electricity production in the Russian Federation

S.I. Noskov¹, E.S. Popov¹, S.P. Seredkin¹, V.V. Tirskikh¹, V.D. Toropov²

¹ Irkutsk State Transport University,

¹15 Chernyshevskogo St., Irkutsk 664074, Russia

² Baikal State University,

²11 Lenina Str., Irkutsk 664003, Russia

Abstract. Objective. The aim of the study is to build a linear regression model of electricity generation in the Russian Federation depending on resource indicators, which include: the volume of coal and gas production, the production of fuel oil. Statistical data for 2005 - 2020 were used as the information base of the study. **Method.** Estimation of unknown parameters of the linear model is carried out using three methods - least squares, modules and anti-robust esti-

mation. They behave differently with respect to outliers in the data. The second of them does not react to outliers at all, completely ignoring them, and the third, on the contrary, strongly gravitates towards them, therefore, these methods are a kind of antagonists in relation to each other. **Result.** Three alternative models of a linear regression model of electricity production with high accuracy are obtained. The value of the parametric stability index of the data sample, based on the properties of the parameter estimation methods, is calculated. Observations are identified that correspond to the maximum and minimum extent to the linear model on the analyzed sample. The values of the contributions of the factors to the right parts of the models are calculated. **Conclusion.** Three versions of the model built by different methods can be successfully used to solve problems related to forecasting the production of electricity in the country. At the same time, the variant constructed by the least squares method is a kind of compromise.

Keywords: electricity generation, linear regression model, least squares, moduli, anti-robust estimation, parametric homogeneity index, factor contributions

For citation: S.I. Noskov, E.S. Popov, S.P. Seredkin, V.V. Tirsikh, V.D. Toropov. 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

Введение. Методы математического моделирования, в частности, регрессионного, активно используются в современной науке для анализа сложных технических и экономических систем. Весьма эффективны они и при исследовании энергетики. Так, в работе [1] разрабатываются регрессионные модели для оценки изменений в эффективности более тысячи генераторов, работающих на угле и природном газе, в зависимости от температуры окружающего воздуха и рабочих переменных для различных типов топлива, первичных двигателей, систем охлаждения и климатических зон в течение нескольких лет - с 2008 по 2017 годы. В [2] модель полиномиальной регрессии используется для анализа нерегулируемого рынка электроэнергии Нигерии. В статье [3] регрессионная модель Тобита используется при выборе типа ветряной турбины для оценки эффективности электростанций. Работа [4] посвящена разработке регрессионной модели для сопоставления данных о производстве электроэнергии и выбросов, и разработке на этой основе алгоритма диспетчеризации выработки электроэнергии в режиме реального времени для сокращения общего объема выбросов загрязняющих веществ. В [5] на основе построения многофакторной регрессионной модели доказано, что значимыми факторами при прогнозировании объема потребления электрической энергии являются тариф рынка на сутки вперед, среднесуточная температура окружающей среды и рабочие/нерабочие дни недели. В [6] рассматривается применение регрессионных методов прогнозирования детерминированных временных рядов для формирования графика нагрузки электрооборудования. Статья [7] посвящена применению методов регрессионного анализа для исследования потребления тепловой энергии населением, промышленными и социальными объектами. Представлены результаты исследования зависимости изменения теплоснабжения от ряда социальных, технических и экономических параметров. По результатам проведенных исследований описана ретроспективная динамика изменения теплоснабжения с помощью одно- и многопараметрических линейных и нелинейных регрессионных уравнений. Полученные регрессионные модели апробированы при прогнозировании уровня теплоснабжения на средне- и краткосрочную перспективу.

Постановка задачи. Энергетика является важнейшей отраслью экономики Российской Федерации. При этом примерно две трети электроэнергии вырабатывается тепловыми электростанциями (ТЭС), а одна треть - и при этом почти поровну, - атомными и гидроэлектростанциями. Целью исследования является построение линейной регрессионной модели производства электроэнергии в Российской Федерации в зависимости от ресурсных показателей. Сформулируем задачу оценки степени влияния ресурсных показателей (газ, уголь, мазут) функционирования ТЭС на производство электроэнергии методами регрес-

сионного анализа. Такое влияние может быть формализовано построением линейной регрессионной модели (уравнения) вида:

$$y_k = \sum_{i=1}^m \alpha_i x_{ki} + \varepsilon_k, k = \overline{1, n}, \quad (1)$$

где y – зависимая, а x_i – i -ая независимая переменные, α_i – i -ый подлежащий оцениванию параметр, ε_k – ошибки аппроксимации, k – номер наблюдения, n – длина выборки данных.

Будем полагать, что все переменные и ошибки в уравнении (1) детерминированы.

Уравнение (1) представим в векторной форме:

$$y = X\alpha + \varepsilon,$$

где $y = (y_1, \dots, y_n)^T$, $\alpha = (\alpha_1, \dots, \alpha_m)^T$, $\varepsilon = (\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n)^T$, X – $(n \times m)$ – матрица с компонентами x_{ki} .

Введем следующие обозначения:

y – производство электроэнергии в Российской Федерации (млн. кВт);

x_1 – объем добычи угля (млн.т);

x_2 – производство мазута (млн.т);

x_3 – объем добычи газа (млрд. м³).

Таким образом, конкретизируем уравнение (1) в форме:

$$y_k = \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 + \alpha_3 x_3 + \varepsilon_k, k = \overline{1, n}. \quad (2)$$

В качестве информационной базы исследования будем использовать статистические данные по Российской Федерации за 2005 – 2020 г. г. [8-13], представленные в табл.1.

Таблица 1. Статистические данные
Table 1. Statistical data

Год	x_1	x_2	x_3	y
2005	299.8	56.7	641	219.2
2006	309.4	59.3	656	221.4
2007	314.1	62.4	653	224
2008	328.9	63.9	665.1	225.5
2009	302.6	64.1	583.1	226.1
2010	323	68.7	650.7	230
2011	336.7	73.4	670.7	233.3
2012	354.9	74.2	654.5	239.7
2013	352	76.9	667.8	242.2
2014	359	78.4	642	256
2015	374	71	635.5	257.1
2016	385.7	56.9	640.2	258.7
2017	411.2	51.2	691.1	261.6
2018	439.3	48	725.4	265.6
2019	441.4	45.8	738	269.8
2020	401.3	40.8	692.3	270.2

Таким образом, $n=16$.

Методы исследования. Широкий класс методов оценивания параметров α_i , $i = \overline{1, m}$ линейного регрессионного уравнения (1) связан с минимизацией функции потерь вида [14]:

$$I_v(\alpha) = \sum_{k=1}^n |\varepsilon_k|^v, v \geq 1.$$

В качестве методов идентификации параметров уравнения (2) будем использовать методы наименьших квадратов (МНК) [14], модулей (МНМ) [15] и антиробастного оценивания (МАО) [16]. Отметим, что эти методы показали свою эффективность при исследовании сложных объектов различной природы, в частности, в работе [17] они применены

для построения дискретной модели производства алюминия. Использование указанных методов приводит в данном случае к решению следующих задач:

- МНК: $I_2(\alpha) = \sum_{k=1}^{16} \varepsilon_k^2 \rightarrow \min;$
- МНМ: $I_1(\alpha) = \sum_{k=1}^{16} |\varepsilon_k| \rightarrow \min;$
- MAO: $I_\infty(\alpha) = \lim_{\mu \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^{16} |\varepsilon_k^\mu| = \max_{k=\overline{1,16}} |\varepsilon_k| \rightarrow \min.$

Их реализация для модели (2) приводит к следующим линейным модельным соотношениям:

а). МНК

$$y = 0.432x_1 + 0.5x_2 + 0.087x_3, \quad (3)$$

$R = 0.998, F = 4309, E = 2.6\%.$

Здесь R – критерий множественной детерминации, F – критерий Фишера, E – средняя относительная ошибка аппроксимации.

б). МНМ:

$$y = 0.455x_1 + 0.76x_2 + 0.052x_3, \quad (4)$$

$E = 2.6\%.$

в). MAO:

$$y = 0.295x_1 + 0.238x_2 + 0.188x_3, \quad (5)$$

$E = 2.9\%.$

Обсуждение результатов. Для МНМ и MAO не приведены значения критериев R и F , поскольку они по отношению к этим методам неприменимы. Очевидно, что модели (3) – (5) обладают весьма высокой точностью – см., в частности, рис.1. Вместе с тем, их параметры весьма существенно различаются. Степень этого различия по отношению к модели (1) можно оценить индексом параметрической стабильности (ИПС) $\mathcal{E}$ [18]:

$$\mathcal{E} = \frac{1}{ym} \sum_{i=1}^m |(\alpha_i^{\text{МНМ}} - \alpha_i^{\text{MAO}}) \bar{x}_i|,$$

где $\alpha_i^{\text{МНМ}}$ и α_i^{MAO} – оценки параметров, вычисленные с применением МНМ и MAO соответственно, а $\bar{x}_i$ – средние на выборке значения независимых переменных:

$$\bar{x}_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_{ki}.$$

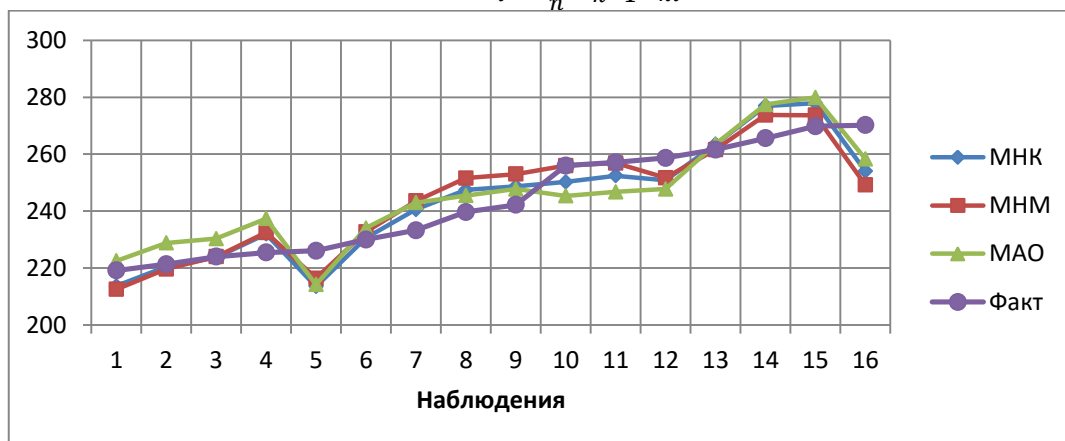


Рис. 1. Фактические и расчетные значения зависимой переменной

Fig. 1. Actual and calculated values of the dependent variable

Такой способ представления ИПС объясняется тем, что МНМ вообще не реагирует на выбросы (наблюдения, не согласующиеся с выборкой в целом), полностью игнорируя их, а MAO, напротив, сильно к ним тяготеет, следовательно, эти методы являются своего рода антагонистами по отношению друг к другу. Значение ИПС для модели (2) по отношению к данным, представленным в табл. 1, нельзя признать низким, т.е. вполне удовлетворительным: $\mathcal{E} = 0.2459$.

Проанализируем значения ошибок аппроксимации ε_k , $k = \overline{1, n}$ для всех трех моделей, представленных в табл. 2.

Таблица 2. Ошибки аппроксимации
Table 2. Approximation errors

Номера наблюдений	МНК	МНМ	МАО
1	5.493	6.653	-3.345
2	0.938	1.737	-7.418
3	0.218	0	-6.375
4	-6.480	-6.994	-11.872
5	12.522	9.654	11.872
6	-0.580	-2.714	-4.064
7	-7.292	-10.249	-9.686
8	-7.743	-11.892	-5.788
9	-6.500	-10.813	-5.581
10	5.773	0	10.658
11	4.663	0.241	10.324
12	7.857	6.995	10.948
13	-1.839	0	-1.895
14	-11.362	-8.117	-11.872
15	-8.066	-3.852	-10.140
16	16.138	20.941	11.872

Воспользуемся для этого свойствами оценок МНМ и МАО [19, 16] по отношению к модели (1), состоящие в следующем. Число нулевых ошибок аппроксимации при использовании МНМ равно m , а число максимальных по модулю ошибок при применении МАО не меньше $m+1$. Это означает, что в максимальной степени модель (2) соответствует наблюдениям с номерами 3, 10, 13 (для МНМ соответствующие им ошибки равны нулю), а в минимальной – наблюдениям с номерами 4, 5, 14, 16 (для МАО соответствующие им ошибки максимальны по модулю). Наконец, исследуем значимость независимых переменных в моделях (3) – (5), т.е. вкладов x_i , $i = \overline{1,3}$ в их правые части [20]. Эти вклады, выраженные в процентах, представлены в табл. 3.

Таблица 3. Вклады независимых переменных в правые части моделей
Table 3. Contributions of independent variables to the right hand sides of the models

Метод	Переменная		
	x_1	x_2	x_3
МНК	42%	49%	9%
МНМ	36%	60%	4%
МАО	41%	33%	26%

Таким образом, вклад переменной x_1 меняется в пределах от 36% до 42% (т.е. достаточно стабилен), x_2 – от 33% до 60% и, наконец, x_3 – от 4% до 26%. Следовательно, наименьшее влияние на производство электроэнергии имеет объем добычи газа, влияние же объемов производства угля и мазута существенно выше и примерно сопоставимо.

Отметим одно важное обстоятельство. Вследствие того, что МНК является своего рода компромиссом между МНМ и МАО по отношению к реакции на выбросы, для практического использования можно рекомендовать модель (3), хотя модели (4) и (5) также могут найти свое применение для решения соответствующих задач.

Вывод. В работе поставлена задача построения линейной регрессионной модели производства электроэнергии в Российской Федерации в зависимости от ресурсных показателей с использованием трех методов идентификации параметров – наименьших квадратов, модулей и антиробастного оценивания. Получены следующие результаты:

1. Построены три альтернативных модели, обладающие высокой точностью.
2. Рассчитано значение индекса параметрической стабильности выборки данных.
3. На основе свойств методов выделены наблюдения, в максимальной и минимальной степени соответствующие линейной модели.
4. Вычислены значения вкладов факторов в правые части моделей.

Библиографический список:

1. Meng M., Sanders K.T. A data-driven approach to investigate the impact of air temperature on the efficiencies of coal and natural gas generators // *Applied Energy*. – 2019.- 253.-113486.
2. Adebisi O.I., Adejumbi I.A. Development of a Load Management Scheme for the Nigerian Deregulated Electricity Market Using Regression Model // *IEEE PES/IAS Power Africa Conference: Power Economics and Energy Innovation in Africa, Power Africa*. - 2019.- 8928928.- pp. 682-687.
3. Sağlam Ü. Assessment of the productive efficiency of large wind farms in the United States: An application of two-stage data envelopment analysis // *Energy, Conversion and Management*. - 2017- 153.- pp. 188-214.
4. Ke Y., Yang X., Xiong Y., Liang X. Power generation dispatching for environmental protection based on recursive neural network and ant colony optimization algorithm//*Information and Control*. - 2017- 46(4).- pp. 415-421.
5. Мохов В.Г., Демьяненко Т.С. Определение значимых факторов при прогнозировании объема потребления электроэнергии по объединенной энергосистеме Урала на основе регрессионного анализа // *Вестник УрФУ. Серия: Экономика и управление*. - 2017. - Т. 16. - № 4. - С. 642-662.
6. Зуева В.Н. Регрессионные методы прогнозирования графика нагрузки электрооборудования // *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета*. - 2017. - № 126. - С. 119-130.
7. Стенников В.А., Добровольская Т.В. Методы регрессионного анализа в исследованиях теплопотребления в России // *Вестник Российского экономического университета имени Г.В. Плеханова*. - 2018. - № 2 (98). - С. 142-153.
8. Официальный портал Федеральной службы государственной статистики. [Электронный ресурс] URL: <https://rosstat.gov.ru> (дата обращения: 21.12.2022).
9. Сайт статистики и аналитики: Мировые финансы. Добыча газа. [Электронный ресурс] URL: <http://global-finances.ru/dobycha-gaza-v-rossii-po-godam/> (дата обращения: 21.12.2022).
10. Сайт статистики и аналитики: Мировые финансы. Добыча угля. [Электронный ресурс] URL: <http://global-finances.ru/dobycha-uglya-v-rossii-po-godam/> (дата обращения: 19.12.2022).
11. Официальный сайт Министерства энергетики Российской Федерации (Минэнерго России). [Электронный ресурс] URL: <https://minenergo.gov.ru/node/1212> (дата обращения: 21.12.2022).
12. Витрина статистических данных статистики. [Электронный ресурс] URL: <https://showdata.gks.ru/finder> (дата обращения: 2.12.2022).
13. Официальный портал Единой межведомственной информационно-статистической системы (ЕМИСС). [Электронный ресурс] URL: <https://www.fedstat.ru/> (дата обращения: 21.12.2022).
14. Демиденко Е.З. Линейная и нелинейная регрессии. - М.: Финансы и статистика. - 1981. - 302с.
15. Носков, С.И. О методе смешанного оценивания параметров линейной регрессии / С.И. Носков // *Информационные технологии и математическое моделирование в управлении сложными системами*. - 2019. - № 1. - С. 14-20.
16. Носков С. И. Метод антиробастного оценивания параметров линейной регрессии: число максимальных по модулю ошибок аппроксимации // *Южно-Сибирский научный вестник*. - 2020.- № 1. - С. 51-54.
17. Носков С.И. Дискретная модель производства алюминия в Российской Федерации // *Вестник Технологического университета*. - 2022. - Т.25. - № 2. - С. 80-82.
18. Носков С.И. Индекс параметрической стабильности регрессионной модели // *Вестник транспорта Поволжья*. - 2021. - № 2 (86). - С. 74-77.
19. Носков С. И., Ильюшонок Д. М. Подход к кластеризации выборки данных на основе метода наименьших модулей // *Южно-Сибирский научный вестник*. - 2020. - № 6. - С. 255-259.
20. Носков С.И. Оценка динамики вкладов факторов в линейной регрессионной модели // *Вестник Воронежского государственного технического университета*. - 2021. - Т. 17. - № 5. - С. 15-19.

References:

1. Meng M., Sanders K.T. A data-driven approach to investigate the impact of air temperature on the efficiencies of coal and natural gas generators. *Applied Energy*. 2019;253:113486.
2. Adebisi O.I., Adejumbi I.A. Development of a Load Management Scheme for the Nigerian Deregulated Electricity Market Using Regression Model. *IEEE PES/IAS Power Africa Conference: Power Economics and Energy Innovation in Africa, Power Africa*. 2019; 8928928: 682-687.
3. Sağlam Ü. Assessment of the productive efficiency of large wind farms in the United States: An application of two-stage data envelopment analysis. *Energy, Conversion and Management*. 2017; 153: 188-214.
4. Ke Y., Yang X., Xiong Y., Liang X. Power generation dispatching for environmental protection based on recursive neural network and ant colony optimization algorithm. *Information and Control*. 2017; 46(4): 415-421.

5. Mokhov V.G., Demyanenko T.S. Determination of significant factors in forecasting the volume of electricity consumption in the unified energy system of the Urals based on regression analysis. *Vestnik UrFU. Series: Economics and Management*. 2017; 16(4): 642-662. [In Russ]
6. Zueva V.N. Regression methods for predicting the load schedule of electrical equipment. *Polythematic network electronic scientific journal of the Kuban State Agrarian University*. 2017; 126: 119-130. [In Russ]
7. Stennikov V.A., Dobrovolskaya T.V. Methods of regression analysis in studies of heat consumption in Russia. *Bulletin of the Russian University of Economics named after G.V. Plekhanov*. 2018; 2 (98):. 142-153. [In Russ]
8. Official portal of the Federal State Statistics Service. [Electronic resource] URL: <https://rosstat.gov.ru> (date of access: 12/21/2022). [In Russ]
9. Site of statistics and analytics: World finance. Gas production. [Electronic resource] URL: <http://global-finances.ru/dobycha-gaza-v-rossii-po-godam/> (date of access: 12/21/2022). [In Russ]
10. Site of statistics and analytics: World finance. Coal mining. [Electronic resource] URL: <http://global-finances.ru/dobycha-uglya-v-rossii-po-godam/> (date of access: 12/19/2022). [In Russ]
11. Official website of the Ministry of Energy of the Russian Federation (Ministry of Energy of Russia). [Electronic resource] URL: <https://minenergo.gov.ru/node/1212> (date of access: 12/21/2022). [In Russ]
12. Showcase of statistical data statistics. [Electronic resource] URL: <https://showdata.gks.ru/finder> (date of access: 2.12.2022). [In Russ]
13. Official portal of the Unified Interdepartmental Information and Statistical System (EMISS). [Electronic resource] URL: <https://www.fedstat.ru/> (date of access: 12/21/2022). [In Russ]
14. Demidenko E.Z. Linear and non-linear regression. *M.: Finance and statistics*. 1981;302. [In Russ]
15. Noskov S.I. On the method of mixed estimation of linear regression parameters. *Information technology and mathematical modeling in the management of complex systems*. 2019; 1:14-20. [In Russ]
16. S. I. Noskov. "An anti-robust estimation method for linear regression parameters: the number of approximation errors that are maximal in modulus," *South Siberian Scientific Bulletin*. 2020;1:51-54. [In Russ]
17. Noskov S.I. Discrete model of aluminum production in the Russian Federation. *Bulletin of the Technological University*. 2022;25(2):80-82. [In Russ]
18. Noskov S.I. Index of parametric stability of the regression model. *Bulletin of transport of the Volga region*. 2021; 2 (86): 74-77. [In Russ]
19. Noskov S. I., Ilyushonok D. M. An approach to clustering a data sample based on the method of least modules. *South Siberian Scientific Bulletin*. 2020; 6: 255-259. [In Russ]
20. Noskov S.I. Evaluation of the dynamics of the contributions of factors in a linear regression model. *Bulletin of the Voronezh State Technical University*. 2021;17(5):15-19. [In Russ]

Сведения об авторах:

Носков Сергей Иванович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры информационных технологий и защиты информации; sergey.noskov.57@mail.ru

Попов Егор Сергеевич, магистрант кафедры информационных технологий и защиты информации; eglr5732@mail.ru

Серёдкин Сергей Петрович, кандидат экономических наук, доцент кафедры информационных технологий и защиты информации; Seredkin_SP@irgups.ru

Тирских Владимир Викторович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры информационных технологий и защиты информации; tirskikh_vv@irgups.ru

Торопов Виктор Дмитриевич, кандидат технических наук, доцент кафедры государственного управления и управления человеческими ресурсами; Toropovvd@bgu.ru

Information about authors:

Sergey I. Noskov, Dr. Sci. (Eng), Prof., Prof., Department of Information Technologies and Information Security; sergey.noskov.57@mail.ru

Egor S. Popov, Undergraduate, Department of Information Technologies and Information Security; eglr5732@mail.ru

Sergey P. Seredkin, Cand. Sci. (Economic), Assoc. Prof., Department of Information Technologies and Information Security; Seredkin_SP@irgups.ru

Vladimir V. Tirskikh, Cand. Sci. (Physico-Mathematical), Assoc. Prof., Department of Information Technologies and Information Security; tirskikh_vv@irgups.ru

Viktor D. Toropov, Cand. Sci. (Eng), Assoc. Prof., Department of Public Administration and Human Resources Management; Toropovvd@bgu.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/ Received 20.12.2022.

Одобрена после рецензирования / Revised 21.01.2023.

Принята в печать /Accepted for publication 21.01.2023.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 303.725.36

DOI: 10.21822/2073-6185-2023-50-1-130-139

Обзорная статья/ Review article

**Совершенствование управления кадровым обеспечением органов внутренних дел
на основе процедур системного анализа**

А.В. Рыбак¹, Р.М. Данилов²

¹Дальневосточный юридический институт МВД России,

¹680000, г. Хабаровск, пер. Казарменный, 15, Россия,

²Хабаровский институт инфокоммуникаций

²Сибирского государственного университета телекоммуникаций и информатики,

²680000, г. Хабаровск, ул. Ленина, 73, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является выявление основных причин нарастающего дефицита кадровых ресурсов территориальных подразделений органов внутренних дел (ОВД) и соответствующих методов их устранения. **Методы.** При изыскании причин кадрового некомплекта ОВД были использованы процедуры системного анализа, на основе которых выявлена центральная проблема кадрового обеспечения ОВД, сформулированы задачи и цели, для решения которых не требуются дополнительные материальные ресурсы. При решении задач применялись математические методы системной динамики и системного анализа. **Результат.** На основе анализа оперативной обстановки, нормативного и методического обеспечения управленческой деятельности органов внутренних дел делается вывод о наличии проблемы системного характера: нарушена динамичность системы управления органами внутренних дел, вследствие чего снижается эффективность управленческого процесса, приводящая к нарастающему тренду некомплекта подразделений ОВД. Для разрешения обозначенной проблематики авторы предлагают следующие технологии: расчет рентабельности работы территориальных подразделений МВД России, позволяющую оценить необходимый и достаточный уровень эффективности применения всех видов ресурсов при выполнении служебных задач; разработку методики расчета кадровой потребности территориальных подразделений МВД России с учетом трудоемкости их деятельности, нагрузки и региональных особенностей; внедрение нового подхода к оценке деятельности подразделений МВД России на основе разделения системы отчетности и системы оценки, совершенствование кадровой политики в плане придания должной привлекательности службе в ОВД с учетом новых ценностей современного общества. Для каждой представленной задачи разработан инструментарий и технология решения. **Вывод.** Решение обозначенных задач обеспечит равномерность и «посильность» нагрузки ее сотрудников, прозрачность оценки их деятельности, что увеличит мотивацию на добросовестный труд. Вкупе с совершенствованием кадровой политики по приданию должной привлекательности службе в органах внутренних дел ожидаемый синергетический эффект позволит снизить остроту проблемы кадрового некомплекта.

Ключевые слова: кадровый некомплект, проблема, цель, задача, оптимальное распределение ресурсов, оценка эффективности деятельности, системный анализ

Для цитирования: А.В. Рыбак, Р.М. Данилов. Совершенствование управления кадровым обеспечением органов внутренних дел на основе процедур системного анализа. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023; 50(1):130-139. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-1-130-139

**Improvement of personnel management of internal affairs bodies on the basis of system
analysis procedures**

A.V. Rybak¹, R.M. Danilov²

¹Far Eastern Law Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia,

¹15 Kazarmenny Lane, Khabarovsk 680000, Russia,

²Khabarovsk Institute of Infocommunications

²Siberian State University of Telecommunications and Informatics,

²73 Lenina St., Khabarovsk 680000, Russia

Abstract. Objective. The purpose of the study is to identify the main causes of the growing shortage of personnel resources of territorial divisions of internal affairs bodies (ATS) and appropriate methods of their elimination. **Method.** When searching for the causes of the personnel shortage of the ATS, the procedures of system analysis were used, on the basis of which the central problem of the staffing of the ATS was identified, a number of tasks and goals were formulated, for the solution of which additional material resources are not required. Mathematical methods of system dynamics were used to solve most problems. **Result.** In the work, based on the analysis of the operational situation, regulatory and methodological support of the management activities of the internal affairs bodies, it is concluded that there is a systemic problem: the dynamism of the management system of the internal affairs bodies is disrupted, as a result of which the effectiveness of the management process decreases, leading to an increasing trend of a shortage of ATS units. To solve the identified problems, the authors propose the following technologies: calculation of the profitability of the work of territorial divisions of the Ministry of Internal Affairs of Russia, which allows to assess the necessary and sufficient level of efficiency of the use of all types of resources in the performance of official tasks; development of a methodology for calculating the personnel needs of territorial divisions of the Ministry of Internal Affairs of Russia, taking into account the complexity of their activities, workload and regional characteristics; introduction of a new approach to assessing the activities of divisions The Ministry of Internal Affairs of Russia, based on the separation of the reporting system and the evaluation system, improving personnel policy in terms of making the service in the Department of Internal Affairs more attractive, taking into account the new values of modern society. For each presented task, its own tools and solution technology have been developed. **Conclusion.** The solution of the identified tasks will ensure the uniformity and "feasibility" of the workload of its employees, the transparency of the assessment of their activities, which will increase the motivation for conscientious work. Coupled with the improvement of personnel policy to make the service in the internal affairs bodies properly attractive, the expected synergetic effect will reduce the severity of the problem of personnel shortage.

Keywords: personnel incompetence, problem, goal, task, optimal allocation of resources, performance evaluation, system analysis

For citation: A.V. Rybak, R.M. Danilov. Improvement of personnel management of internal affairs bodies on the basis of system analysis procedures. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science. 2023; 50(1):130-139. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-1-130-139

Введение. Изучение управленческих отношений в сфере деятельности органов внутренних дел (ОВД) за последнее десятилетие позволяет отметить, что основной вектор управленческих воздействий сфокусирован на решении краткосрочных вопросов, где выбор альтернатив принятия решений ограничен временными и ресурсными рамками, а основные задачи формулируются исходя из текущей динамики оперативной обстановки и соответствующей подготовки и реализации решений коллегий различного уровня.

Безусловно, такой подход к организации процесса управления противоречит кардинальным изменениям внешней среды и самой системы управления ОВД, связанными с активным внедрением современных инфокоммуникационных технологий и формированием нарастающего тренда избыточности многомерной и противоречивой информации о преступности и причинах ее порождающих, уменьшением роли рекурсивных и увеличением синергетических связей между основными компонентами деятельности ОВД. Од-

ним из проявлений этого противоречия является фактор сформировавшегося устойчивого кадрового некомплекта территориальных органов МВД России.

Постановка задачи. Попробуем разобраться с этой проблемой и наметить возможные пути ее разрешения. Анализ оперативной обстановки на территории Российской Федерации за последние три - четыре года позволяет выделить ряд моментов, требующих к себе серьезного внимания. Прежде всего следует отметить, что ухудшение эпидемиологической обстановки в стране привело к негативным изменениям в экономической и социальной сферах, в то время как серьезных изменений в криминальной обстановке не произошло. Значительная динамика здесь проявилась не столько в количественных, сколько в качественных характеристиках. Действительно с 2019 по 2021 г. в Российской Федерации количество зарегистрированных преступлений изменилось незначительно, при этом наблюдается устойчивая тенденция уменьшения числа выявленных лиц, совершивших преступления [1]. Это, безусловно, в дальнейшем может выступить причиной роста преступности. Статистические показатели зарегистрированной преступности в федеральных округах Российской Федерации в рассматриваемый период соответствуют общим тенденциям в стране.

В то же время обращает на себя внимание достаточно устойчивый тренд падения раскрываемости наиболее наукоемких преступлений, таких как кража и мошенничество по ст. 158.3, 159.3, 159.6 УК РФ, связанных с работой платежных систем, с использованием информационно-телекоммуникационных технологий в сфере компьютерной информации [1]. Здесь имеют место как объективные, так и субъективные причины.

Первая – объективная, связана с взрывным характером распространения и применения современных информационных технологий всеми социальными слоями населения: количество таких преступлений по стране за последние годы увеличивается ежегодно на 70 – 80%. Это привело к тому, что во многих территориальных органах внутренних дел превышен предельный уровень возможности «переработки» такого потока расследуемых преступлений из-за несоответствия этим задачам кадрового, информационного, технического обеспечения. Как следствие, падает качество процесса расследования преступлений, появляется проблема укрывательства, наблюдается резкое увеличение количества нераскрытых преступлений. Раскрываемость подобного рода преступлений с 2018 по 2021 год по некоторым статьям УК РФ снизилась почти в три раза и достигла девяти процентов [1].

Вторую причину можно назвать субъективной – несоответствие профессионального уровня подготовки сотрудников территориальных органов МВД России и правового обеспечения их деятельности к противодействию преступности в сфере инфокоммуникационных технологий. Так, в апреле 2018 года, внесены изменения в статью 158 Уголовного Кодекса Российской Федерации, в соответствии с которыми она дополнена пунктом «г» части 3, предусматривающей уголовную ответственность за хищение денежных средств с банковского счета потерпевшего. Только по Хабаровску, согласно проведенному анализу, по итогам работы за 12 месяцев 2019 года по ч. 3 ст. 158 УК РФ приостановлено уголовных дел более чем в три раза по сравнению с АППГ [1].

Причиной такого положения является не столько слабая подготовка и недостаток квалифицированных сотрудников «продвинутых» в области информационных технологий, сколько отсутствие у них должной мотивации на добросовестный труд и повышение своей квалификации. В совокупности с кадровым некомплектом, который по некоторым территориальным подразделениям достигает двадцатипроцентного уровня, положение становится достаточно критичным. Критичность заключается в том, что тренд кадрового некомплекта имеет тенденцию к росту, практически по всем основным направлениям деятельности территориальных подразделений: следствию, дознанию, уголовному розыску, патрульно-постовой службе, что свидетельствует о системных проблемах в управлении деятельностью ОВД. Резкое снижение результатов борьбы с преступностью в сфере инфокоммуникационных технологий лишь наглядно демонстрирует проявление системных проблем в наиболее слабом звене управления органами внутренних дел. При сохране-

нии статус-кво в системе управления ОВД в дальнейшем закономерно следует ожидать снижение результатов борьбы с преступностью в целом.

Методы исследования. Для поиска возможных путей решения обозначенной проблемы воспользуемся инструментарием типовой технологии системного анализа [7]. Основным назначением системного анализа является последовательное снижение энтропии системы управления до уровня подготовки и принятия оптимального управленческого решения на основе сравнения проработанных и оцененных альтернатив по уровню затрат и эффективности достижения цели.

Решение такой многоплановой задачи требует учета двух важных аспектов:

1. Необходимость однозначного формулирования целей, проблем и задач системы управления органами внутренних дел. В нашем случае это является наиболее сложным моментом, так как понятие цели управления деятельностью органов внутренних дел не имеет четкого формулирования в нормативной литературе и заменяется задачами. Но отсутствие понятия цели в управленческих отношениях органов внутренних дел не позволяет построить иерархию целей, задач и соответственно ресурсов. Как следствие, руководителям территориальных подразделений для управления процессом решения служебных задач приходится в качестве цели использовать количественные показатели результатов деятельности подразделений за прошлый период, так называемый АППГ. Хотя официально такой подход запрещен, но при отсутствии официальной логики построения целевого показателя другого варианта построения цели нет. В результате имеет место разрыв взаимосвязи между целью и динамикой оперативной обстановки и, как следствие, – волюнтаризм в управлении, приводящий к невозможности оптимального управления ресурсами и разрушению мотивационного механизма сотрудников на добросовестный труд.

2. Проблема роста кадрового некомплекта территориальных подразделений является сложной проблемой, включающей в себя много различных факторов, которые не могут быть охвачены одной научной дисциплиной или сферой деятельности. Для разрешения проблемы такого уровня требуется знания и квалификация специалистов из разных областей науки даже не обязательно смежных. Здесь важно по-разному посмотреть на проблему: с точки зрения экономиста, юриста, социолога, математика и пр. Подходы, свойственные этим специальностям, могут лучше способствовать отысканию оптимальных решений.

На основании вышесказанного, используя инструментарий системного анализа [7], рассмотрим первоочередные задачи, которые необходимо решить для снятия остроты проблемы кадрового некомплекта территориальных подразделений МВД России. Для этого сформулируем понятия цели и задачи.

Понятие «цель» всегда являлось центральным понятием в управленческой сфере, вокруг которого не утихали споры, как в прошлом, так и в настоящее время на различных уровнях: философском, технологическом, логическом и т.п. Здесь сформировалось два основных направления: большинство считают, что цель активна, остальные – пассивна и ассоциируют ее с потребностью [7].

Объединяющим началом для обоих направлений является то, что цель – это вопрос, который требует решения. Но задачи, стоящие перед органами внутренних дел, столь разнообразны по сфере деятельности и масштабу, что требуется найти критерий их типизации, который позволит выразить цель как состояние объекта через набор параметров. Отсутствие такого критерия во многом объясняет отсутствие сформулированной цели деятельности органов внутренних дел в ведомственных нормативных и методических документах и материалах.

В качестве элемента типизации предлагается применить наличие неопределенности в вопросе. При этом неопределенность может быть двух типов: неопределенность, устранение которой невозможно в данный момент времени, так как нет соответствующих ресурсов; неопределенность, устранение которой возможно в реаль-

ном времени. Такой подход позволяет разделить все виды вопросов на два типа: проблемы и задачи.

Под проблемой будем понимать разновидность вопроса, имеющего четко поставленную цель (в количественном или в качественном эквиваленте), пути достижения которой не могут быть установлены достаточно строго в данный момент времени. Под задачей будем понимать разновидность вопроса, имеющего четко поставленную цель (в количественном эквиваленте) и конкретный путь (несколько путей) ее решения. Из этого вытекает, что содержание целей уровня задач и уровня проблем различны.

В нашем случае проблемой является недостаточная кадровая обеспеченность территориальных подразделений МВД России, ее несоответствие требованиям оперативной обстановки. В основе любой проблемы лежит сложившееся противоречие. В рамках обозначенной проблемы – это противоречие между кадровой потребностью органов внутренних дел в квалифицированных, физически здоровых и мотивированных специалистах, способных решать служебные задачи на достаточном профессиональном уровне и существенным отставанием для этого соответствующей методологии и методик, применяемых в системе управления органами внутренних дел.

Цель уровня проблемы – объективно-общественная необходимость, которая может быть установлена и выражена набором количественных или качественных показателей, состав и пределы отклонений которых полностью в настоящий момент не могут быть определены.

На основании этого в качестве цели обозначенной выше проблемы следует выбрать оптимальную кадровую обеспеченность территориальных органов в соответствии с оперативной обстановкой и региональными особенностями региона.

Обсуждение результатов. Безусловно, полный перечень всех задач для снятия этой проблемы сложно даже сформулировать, так как он охватывает широкий круг вопросов: экономических, политических, организационных, ментальных и т.п. В то же время в этой проблеме можно выделить ряд задач, решение которых позволит, если не снять проблему, то, по меньшей мере, устранить ее остроту. Прежде всего, это:

- разработка методики оценки рентабельности работы территориальных подразделений МВД России, отражающей необходимый и достаточный уровень эффективности применения всех видов ресурсов при выполнении служебных задач;

- разработка методики расчета кадровой потребности территориальных подразделений МВД России с учетом динамики оперативной обстановки и региональных особенностей;

- внедрение нового подхода к оценке деятельности территориальных органов внутренних дел МВД России на основе измерения и учета квалифицированного труда его сотрудников при выполнении служебных задач.

- совершенствование кадровой политики органов внутренних дел в плане учета новых ценностей, сформировавшихся в российском обществе на основе активного внедрения в повседневную жизнь современных информационных технологий и придание в этих условиях должной привлекательности службе в органах внутренних дел;

1. Оценка рентабельности. Эффективность применения всех видов ресурсов при решении служебных задач напрямую влияет на кадровую потребность территориальных подразделений. Чем выше эффективность работы подразделений, тем меньше кадровая потребность, а значит «затратность» их деятельности. Анализ нормативной и методической литературы, посвященной этой тематике, позволяет сделать вывод, что понятие эффективности обычно используется как синоним результативности, что является не корректным с точки зрения классического управления. Так, эффективность работы следственных подразделений оценивается, прежде всего, по количеству уголовных дел, отданных в суд с обвинительным заключением за отчетный временной интервал. Поэтому для избегания противоречий будет уместным применить в этом случае термин «рентабельность». Следует отметить, что за рубежом при анализе полицейской деятельности все

большее внимание начинает уделяться измерению затраченных ресурсов для достижения намеченных целей и решения поставленных задач в борьбе с преступностью. Этот подход представляет собой процедуру сравнения различных методов и путей достижения одинаковых результатов для выяснения наиболее рентабельного из них [3].

Безусловно, рентабельность – это экономический термин, отражающий отношение прибыли к формирующим ее потокам. В нашем случае, под рентабельностью деятельности органов внутренних будем понимать степень соответствия использования информационных, материальных и кадровых ресурсов (потоков) при выполнении служебных задач нормативам рентабельности, разработанными на основе экспертных процедур и математических методов системной динамики.

В качестве инструмента для разработки нормативов рентабельности деятельности подразделений при решении служебных задач предлагается использовать модель системной динамики, рассмотренные автором применительно к оценке деятельности следственных подразделений [2].

В основе этой модели лежит доказанный фактор динамического равновесия представленных параметров оперативной обстановки, которые находятся между собой в экспоненциальной зависимости [8].

$$\alpha = \frac{Y \cdot R}{V} \cdot \left(1 - e^{-\frac{V}{Y \cdot R}}\right), \quad (1)$$

где α – рассматривается как нормативный показатель расследованных преступлений или как норматив рентабельности деятельности подразделения;

Y – расчетный показатель «оптимальной эффективности» одного сотрудника подразделения за отчетный период;

R – реальная численность сотрудников подразделения;

V – реальная нагрузка на подразделение (в следственных подразделениях – это количество уголовных дел в производстве за отчетный период).

Определяющим элементом этой модели является показатель оптимальной эффективности Y . Для его расчета предварительно проводится экспертиза по категорированию всех преступлений, регистрируемых в регионе, по степени трудоемкости расследования. Трудоемкость расследования определяется экспертами на основе выбранных ими параметров. Это могут быть: количество обоснованных следственных действий, количество эпизодов, количество сложных экспертиз, необходимость специальных знаний и т.п. Для каждой категории производится оценка временных параметров расследования, в процессе которой экспертами вырабатывается решение с учетом региональных особенностей территории, обслуживаемой подразделением.

Допустим проведенной экспертизой, что все преступления классифицированы на k категорий. Временной параметр расследования преступлений каждой категории разрабатывается экспертами в виде средней нормы расследования за отчетный период на одного следователя соответственно: $n_1, n_2, n_3 \dots n_k$ уголовных дел.

В данном параметре учитываются трудоемкость расследования преступлений конкретной категории с учетом региональных особенностей, влияющих на организацию и проведение следственных действий, а также учтен фактор предельной нагрузки подразделения, по достижению которого объективно снижается эффективность его работы. Затем по данным статистики определяется доля преступлений каждой категории в общем количестве преступлений за отчетный год соответственно: $d_1, d_2, d_3 \dots d_k$. Тогда Y можно считать по формуле средневзвешенной величины:

$$Y = \frac{\sum_{i=1}^k d_i \cdot n_i}{\sum_{i=1}^k d_i} \quad (2)$$

Подставляя Y вместе с известными величинами R и V в формулу (1), получим итоговый показатель α , который будет являться мерой (нормой) рентабельности работы подразделения. Если реальный коэффициент расследованных преступлений (примени-

тельно к работе следственных подразделений) соответствует или больше показателя α , то работа подразделения оценивается как рентабельная. Чем больше превышение, тем более высокой оценки заслуживают результаты работы подразделения. Более того, здесь возникает возможность постановки количественной цели без использования итоговых показателей деятельности подразделения. Например, цель может быть сформулирована как: «Повысить рентабельность работы подразделения на 10%».

Более подробно методика применения этой модели представлена в [2, 5].

2. Расчет кадровой потребности. Представленная модель может быть использована для расчета кадровой потребности территориальных подразделений в зависимости от изменения оперативной обстановки с учетом региональных особенностей. Для этого необходимо, например, для следственных подразделения задать «желаемый» показатель расследованных преступлений α , затем по формуле (1) определить (подобрать) соответствующую известным параметрам Y и V кадровую потребность R . Региональные особенности, предельная нагрузка, трудоемкость расследования преступлений будут учтены при расчете Y .

Следует отметить особую универсальность этой модели, которая заключается в том, что круг задач, которые можно решать с ее помощью не замыкается предварительным расследованием преступлений. Модель можно использовать для оценки рентабельности и расчета кадровой потребности подразделений по различным направлениям деятельности. Для этого необходимо выбрать базовый параметр модели. Для уголовного розыска – это может быть количество выявленных и раскрытых преступлений, для дежурных частей – количество принятых и обработанных заявлений и сообщений граждан, для участковых уполномоченных – количество административных протоколов и т.п.

3. Оценка деятельности подразделений. Методологические проблемы оценки деятельности территориальных подразделений МВД России также заслуживают самого серьезного внимания. Подходы к оценке деятельности органов внутренних дел, преобладающие в последние десятилетия и связанные в основном с количественной оценкой итогов работы подразделений, не стали соответствовать изменившимся требованиям, предъявляемым к органам внутренних дел.

Прежде всего, при оценке деятельности подразделений обращает на себя внимание акцент на одном сотруднике: количество уголовных дел, переданных в суд с обвинительным заключением в расчете на одного следователя, количество выявленных преступлений в расчете на одного оперуполномоченного, количество административных протоколов в расчете на одного участкового уполномоченного и т.п. [9]. Такой подход не позволяет учитывать необходимость и возможность формирования синергетических связей между сотрудниками и появлению эмерджентных свойств подразделений в результате эффективного управления. Таким образом, качество и уровень управления территориальными подразделениями в действующей технологии оценки не анализируется.

На основании приказа МВД России от 31.12.2013 № 1040 «Вопросы оценки деятельности территориальных органов Министерства внутренних дел Российской Федерации» система отчетности и система оценки деятельности территориальных подразделений формируется на основе статистических показателей, расчетных оценочных показателей, итоговых оценочных показателей, которые слабо учитывают разную трудоемкость деятельности подразделений при решении типовых служебных задач. При этом не учитываются региональные факторы преступности, природно-географические и экономические особенности регионов, ментальные характеристики проживающего в них населения, влияющие на организацию деятельности органов внутренних дел.

Также следует учитывать, что криминологические факторы, уровень и динамика преступности практически слабо зависят от результатов деятельности органов внутренних дел. В основном это продукт совокупности политических, экономических, демографических и иных факторов. В этой связи оценивать эффективность деятельности органов

внутренних дел по динамике преступности и количеству уголовных дел, переданных в суд с обвинительным заключением, является методологически некорректным подходом.

Таким образом, назрела необходимость отделения системы отчетности от системы оценки. Система отчетности должна продолжать формировать ведомственную статистику – основу изучения криминогенной обстановки. Для системы оценки необходимо разработать специальные индикаторы, позволяющие оценивать рентабельность работы подразделения с учетом региональных особенностей, динамики нагрузки и трудоемкости расследования преступлений в его производстве за анализируемый период. В качестве теоретической основы можно использовать модель динамического равновесия параметров оперативной обстановки [1].

4. Привлекательность службы в органах внутренних дел. Вопрос эффективной кадровой политики органов внутренних дел достаточно многослойный и требует множество разноплановых управленческих решений, среди которых следует выделить задачу, которая является определяющей для всех остальных – это придание должной привлекательности службе в органах внутренних дел для молодежи.

Это задача архисложная, так как набор жизненных ценностей современного молодого человека далеко не соответствует требованиям, предъявляемым к сотрудникам органов внутренних дел. Взрывное распространение информационных технологий, преобразуя повседневную жизнь человека и формируя его новый жизненный опыт, меняет саму личность. Поэтому простое повышение денежного довольствия (экономический интерес) не приведет к полному и качественному решению проблемы кадрового обеспечения.

Известный российский экономист М.Г. Делягин считает, что наиболее яркой из всех трансформаций норм общественного поведения в настоящее время является смена доминирующей мотивации [6]. Прежде всего, это снижение относительной ценности материального потребления за счет роста эмоционального. Появление в ряде трудов современных социологов и экономистов понятия «клипового», а затем и «кликерного» мышления среди молодежи [6] отражает глубокие изменения в этой среде, которые требуют нового максимально-точного ее описания, как объекта управления, при формировании со стороны государства (субъекта управления) привлекательности службы в органах внутренних дел. Как отмечает Т.А. Бондаренко «в настоящее время воздействие на различные элементы механизма формирования престижа органов внутренних дел носит противоречивый характер из-за отсутствия системности управления этим процессом» [11].

Для реализации системного подхода в процессе решения обозначенной задачи следует, прежде всего, «измерить» все социальные объекты, на которые будет направлено управленческое воздействие, сформировать их характеристики, которые в дальнейшем будут определять все решения в отношении формирования привлекательности службы в органах внутренних дел для различных общностей: профессиональных, социальных и поколенческих групп.

При этом следует помнить, что в большинстве случаев технология формирования привлекательности в современном информационном обществе должна быть направлена, прежде всего, на взаимодействие с массовым сознанием, которое имеет ряд принципиальных отличий от сознания индивидуального. При работе с современным массовым сознанием плохо работают логические аргументы и рациональные доводы. В основном здесь преобладают эмоциональные коммуникации, в связи с чем, необходим переход от рационального воздействия к эмоциональному.

Вторым аспектом процесса формирования привлекательности службы в органах внутренних дел является выявление или разработка типовых атрибутов органов внутренних дел, которые определяют содержание управленческих воздействий, улучшающих их имидж. Атрибуты связаны со статусом типового представителя социального объекта, его ролью в социальном пространстве, социально-демографическими характеристиками, интересами, ценностями, стереотипами т.п.

Например, в рамках такого подхода следует провести интерпретацию целей и задач органов внутренних дел, их назначения для каждого социального объекта, так как различные социальные общности воспринимают органы внутренних дел не только формально, но и эмоционально, ситуативно, часто с перекосами и искажениями. Целью выполнения такой задачи является замена сложной системы взаимоотношений между социальным объектом и органами внутренних дел некой картинкой, которая легко воспринимается любым индивидуумом. В условиях растущего влияния коммуникативных потоков на жизнь обычного человека это является наиболее рациональным методом формирования привлекательности службы в органах внутренних дел среди различных слоев населения [13].

Вывод. Подводя итог, следует отметить, что решение обозначенных задач позволит повысить эффективность управления территориальными органами внутренних дел, обеспечить равномерность и посильность нагрузки ее сотрудников, «прозрачность» оценки их деятельности, снизить ротацию кадров, увеличить мотивацию на добросовестный труд, повысит привлекательность службы в органах внутренних дел. Синергетический эффект от решения этих задач должен проявиться в разрешении проблемы некомплекта в территориальных подразделениях МВД России.

Библиографический список:

1. Состояние преступности в России (2018, 2019, 2020, 2021 г.г.): Статистический сборник. / М.: Генеральная прокуратура Российской Федерации, 2022.
2. Рыбак, А.В. Вопросы оценки деятельности следственных подразделений. Эффективность и мотивация. / А.В. Рыбак // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия «Естественные и технические науки». 2020, №8/2. С. 64-69.
3. Критерии оценки деятельности полиции. Обзорная информация. Зарубежный опыт. / М.: ФКУ «ГИАЦ МВД РФ». 2018, 1.
4. Гусев, Р.Г. Методологические подходы к оценке деятельности полиции / Р.В. Гусев // Современное право. М.: Новый Индекс. 2012, №5. С.81-82.
5. Рыбак, А.В. Системный анализ в диссертационном исследовании. Технология и особенности применения в сфере юридических наук. / А.В. Рыбак // Современное педагогическое образование. 2018, №6. С.231-236.
6. Делягин М.Г. Конец эпохи: осторожно, двери открываются! Общая теория глобализации. / М.: ИПРОГ «Книжный мир». 2019. 832 с.
7. Стабин, И.П. Автоматизированный системный анализ: учебник. / М.: Машиностроение. 1984. 309 с.
8. Минаев В.А. Кадровые ресурсы органов внутренних дел: современные подходы к управлению / Монография. М.: Академия МВД СССР. 1991.193 с.
9. Попова, О.А. Оценка эффективности деятельности правоохранительных органов и качество расследования преступлений. / О.А. Попова // Современные проблемы науки и образования. 2015, №1. С.102–112.
10. Золотухина, Н.В. Об оценке качества предварительного следствия через статистические и ведомственные рейтинговые показатели деятельности Следственного комитета Российской Федерации. / Н.В. Золотухина //Расследование преступлений: проблемы и пути их решения. 2017, №4. С 105–108.
11. Бондаренко, Т.А. Формирование престижа органов внутренних дел: технология управленческого воздействия / Т.А. Бондаренко // Управленческое консультирование. 2012, №3, С176 – 181.
12. Минаев, В.А. Математическое регулирование региональных криминологических процессов. /В.А. Минаев, В.Д. Курушин, Д.В. Захаров //Новосибирск, 1992. 159 с.
13. Передня, Д.Г. Технология формирования имиджа органов внутренних дел / Д.Г. Передня //Труды Академии управления МВД России. Проблемы управления правоохранительной деятельностью. 2016, №1. С 36 – 41.

References:

1. The state of crime in Russia (2018, 2019, 2020, 2021): Statistical compendium. M.: General Prosecutor's Office of the Russian Federation, 2022.[In Russ]
2. Rybak, A.V. Issues of evaluating the activities of investigative units. Efficiency and motivation. *Modern Science: Actual Problems of Theory and Practice. Series "Natural and technical sciences"*. 2020; 8(2): 64-69.[In Russ]

3. Criteria for evaluating the activities of the police. Overview information. Foreign experience. / М.: FKU "GIATs MVD RF". 2018; 1.[In Russ]
4. Gusev, R.G. Methodological approaches to the assessment of police activity. *Modern law. Moscow: New Index*. 2012; 5:81-82.[In Russ]
5. Rybak, A.V. System analysis in dissertation research. Technology and features of application in the field of legal sciences. *Modern Pedagogical Education*. 2018; 6:231-236.[In Russ]
6. Delyagin M.G. End of an era: watch out, the doors are opening! General theory of globalization. М.: IPROG "Book World". 2019; 832.[In Russ]
7. Stabin, I.P. Automated system analysis: textbook. М.: *Mashinostroenie*. 1984;309.[In Russ]
8. Minaev V.A. Personnel resources of internal affairs bodies: modern approaches to management. Monograph. М.: *Academy of the Ministry of Internal Affairs of the USSR*. 1991;193 .[In Russ]
9. Popova O.A. Evaluation of the effectiveness of law enforcement agencies and the quality of investigation of crimes. *Modern problems of science and education*. 2015; 1:102–112.[In Russ]
10. Zolotukhina, N.V. On assessing the quality of the preliminary investigation through statistical and departmental rating indicators of the activities of the Investigative Committee of the Russian Federation. *Investigation of crimes: problems and ways to solve them*. 2017; 4:105–108 [In Russ]
11. Bondarenko, T.A. Formation of the prestige of internal affairs bodies: technology of managerial influence / T.A. Bondarenko. *Management consulting*. 2012; 3:176 - 181[In Russ]
12. Minaev, V.A. Mathematical regulation of regional criminological processes. /V.A. Minaev, V.D. Kurushin, D.V. Zakharov. Novosibirsk, 1992; 159 [In Russ]
13. Perednya, D.G. Technology for the formation of the image of the internal affairs bodies. D.G. Front. *Proceedings of the Academy of Management of the Ministry of Internal Affairs of Russia. Problems of law enforcement management*. 2016; 1:36 – 41[In Russ]

Сведения об авторах:

Рыбак Александр Владимирович, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры информационного и технического обеспечения органов внутренних дел; rybak_2908@mail.ru

Данилов Роман Михайлович, кандидат технических наук, заведующий кафедрой информационных технологий; danilovroman@mail.ru

Information about authors:

Alexander V. Rybak, Cand.Sci. (Eng.), Assoc. Prof.; Prof., Department of Information and Technical Support of Internal Affairs Bodies; rybak_2908@mail.ru

Roman M. Danilov, Cand.Sci. (Eng.), Head of the Department of Information Technologies; danilovroman@mail.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 12.01.2023.

Одобрена после рецензирования/ Revised 31.01.2023.

Принята в печать/Accepted for publication 31.01.2023.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 007.52

DOI: 10.21822/2073-6185-2023-50-1-140-151

Оригинальная статья /Original Paper

**Алгоритм мониторинга динамической зоны распространения лесных пожаров
группой беспилотных летательных аппаратов**

Ф.Б. Тебугева, В.О. Антонов, М.Ю. Кабиняков, Н.Ю. Свистунов

Северо-Кавказский федеральный университет,
355017, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является разработка алгоритма мониторинга зон лесных пожаров, осуществляемого беспилотными летательными аппаратами (БПЛА). **Метод.** Исследование основано на методах алгоритмического обеспечения, методах анализа и синтеза систем автоматизированного управления технологическими объектами. **Результат.** Рассмотрены технологии и методы мониторинга лесных пожаров, что подтверждает актуальность применения БПЛА для выполнения данных задач. Приведен алгоритм применения роев БПЛА для мониторинга зон лесных пожаров. Алгоритм включает укрупненные этапы декомпозиции глобальной задачи, распределения задач, применения методов коллективного принятия решений и др. **Вывод.** Предлагаемый алгоритм может быть реализован при условии развития теории роевого управления.

Ключевые слова: мониторинг лесных пожаров, беспилотные летательные аппараты, БПЛА, алгоритм мониторинга

Для цитирования: Ф.Б.Тебугева, В.О. Антонов, М.Ю. Кабиняков, Н.Ю. Свистунов. Алгоритм мониторинга динамической зоны распространения лесных пожаров группой беспилотных летательных аппаратов. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023; 50(1):140-151. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-1-140-151

Algorithm for monitoring the dynamic zone of forest fires by a group of unmanned aircraft

F.B. Tebugeva, V.O. Antonov, M.Yu. Kabinyakov, N.Yu. Svistunov

North-Caucasus Federal University,
1 Pushkina Str., Stavropol 355017, Russia

Abstract. Objective. The aim of the study is to develop an algorithm for monitoring forest fire zones, carried out by unmanned aerial vehicles (UAVs). **Method.** The study is based on methods of algorithmic support, methods of analysis and synthesis of automated control systems for technological objects. **Result.** The technologies and methods for monitoring forest fires are considered, which confirms the relevance of the use of UAVs to perform these tasks. An algorithm for the use of UAV swarms for monitoring forest fire zones is presented. The algorithm includes enlarged stages of decomposition of the global problem, distribution of tasks, application of methods of collective decision-making, etc. **Conclusion.** The proposed algorithm can be implemented subject to the development of swarm control theory.

Keywords: monitoring of forest fires, unmanned aerial vehicles (UAVs), a swarm of UAVs, monitoring algorithm

For citation: F.B. Tebugeva, V.O. Antonov, M.Yu. Kabinyakov, N.Yu. Svistunov. Algorithm for monitoring the dynamic zone of forest fires by a group of unmanned aircraft. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science. 2023; 50(1):140-151. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-1-140-151

Введение. Развитие современных систем мониторинга зон ЧС связано с негативной тенденцией изменения состояния окружающей среды, выражающейся в активизации

неблагоприятных, опасных природных явлений и процессов и, соответственно, в увеличении частоты и масштабов стихийных бедствий, перерастании природных катастроф в техногенные и, наоборот. Рост технологического прогресса в сфере робототехнических, спутниковых и беспилотных авиационных систем позволяет производить мониторинг развития ЧС для оценки состояния окружающей среды, техногенных объектов, анализа происходящих в них процессов и явлений для своевременного выявления тенденций их изменения с целью обеспечения предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера.

Постановка задачи. В данном исследовании внимание уделяется разработке алгоритма мониторинга зон лесных пожаров, осуществляемого беспилотными летательными аппаратами. Текущие системы мониторинга лесных пожаров можно охарактеризовать как полуавтоматические, вследствие чего возникают сложности при проведении мониторинга и прогнозировании развития зоны ЧС для выявления факторов риска резкого роста масштабов в полностью автономном режиме.

При возникновении крупных лесных пожаров (от 250 Га) задача мониторинга зоны распространения реализуется различными средствами: наземными средствами (датчиками), классической и беспилотной авиацией, спутниковым мониторингом.

Рассмотрим некоторые проблемы мониторинга зон ЧС различными средствами. Классическая пилотируемая имеет ограниченную эффективность по причине высокой стоимости воздушных судов, расходов на обслуживающий персонал, пилотов и инфраструктуру. Наличие человеческого фактора также негативно сказывается на эффективности пилотируемой авиации. Несмотря на выгоды от применения эксплуатации пилотируемых самолетов при лесных пожарах обходится дорого, во многих случаях менеджеры пропускают воздушную разведку, однако это может потребоваться для эффективного вмешательства [1].

В качестве замены пилотируемой авиации стал использоваться спутниковый мониторинг земных поверхностей. Спутниковый мониторинг является входными данными для множества алгоритмов, из себя представляет источник информации, позволяющий оперативно реагировать на возникновение техногенных и природных чрезвычайных ситуаций, объективно оценивать их масштабы и степень нанесенного ущерба, эффективно бороться с последствиями аварий и катастроф. На примере компании «СКАНЭКС» [2] в РФ спутниковый мониторинг используется для мониторинга лесопожарной обстановки, других техногенных ЧС и их последствий. Несмотря на перспективность спутникового мониторинга, присутствуют некоторые недостатки. В виду низкой разрешающей способности спутников небольшие возгорания могут остаться незамеченными, а обновление информации несколько раз в сутки не обеспечивает высокую оперативность при ликвидации последствий ЧС [3]. Стоит заметить, что спутниковые данные невозможно использовать для, например, взятия проб атмосферы при единовременном мониторинге зоны ЧС, что может параллельно выполнять авиация.

Еще один способ мониторинга и выявления лесных пожаров на ранних стадиях заключается в использовании контактных вышек. Контактные вышки с камерами при мониторинге зон ЧС создают сложности передачи и обработки информации. Основным недостатком данного способа обнаружения является необходимость постоянного использования человеческого труда в каждой точке расположения вышки, в течение всего времени пожароопасного сезона (для обеспечения оперативности) и ограничение территории мониторинга количеством установленных вышек. Постройка, эксплуатация и обслуживание вышек является очень дорогостоящей процедурой. Использование контактных датчиков при мониторинге зон ЧС создает сложности передачи и обработки информации с киберфизических систем [4]. Недостаточная мобильность датчиков позволяет отслеживать динамику развития только при высокой плотности покрытия не только зоны предпосылки ЧС, но и возможной зоне распространения поражающих факторов. Однако для высокого разрешения измерений зоны ЧС только при ЧС регионального характера речь идет о тысячах датчиков.

- обеспечение непрерывного мониторинга и прогнозирования развития чрезвычайных ситуаций (фото/видео);
- координация между командами спасателей и штабом для более эффективного управления спасательной операцией и снижения потерь;
- автоматический мониторинг территории без участия оператора на предмет возникновения ЧС (возгорания/наводнения, неисправности на энергетических объектах – ЛЭП, газопровод);
- поиск людей и животных с помощью тепловизора;
- обеспечение проведения работ на объектах с повышенной опасностью для жизни и здоровья людей (высокие концентрации токсичных веществ, радиация, неустойчивые строительные конструкции);
- доставка спасательных средств, медикаментов и средств жизнеобеспечения (вода, еда) в районы ЧС;
- информирование населения о возникновении ЧС с помощью громкоговорителя;
- пеленгация сигналов мобильных телефонов пострадавших в ЧС и обеспечение с ними связи в условиях отсутствия покрытия сотовой сети;
- ретрансляция радио- и телесигналов при отсутствии прямой радиовидимости;
- проведение спектрального анализа земной поверхности для предупреждения экологических бедствий и катастроф;
- обеспечение контроля и безопасности движения спасательных транспортных средств.

Перечисленные задачи становятся осуществимыми за счет очевидных преимуществ БПЛА перед другими пилотируемыми воздушными силами, в частности, большой скорости и эффективности реагирования, маневренности, возможности полета на сверхмалых высотах и полной безопасности для пилота.

Рассмотрим текущее состояние науки и техники по данному вопросу. В Российской Федерации у исследователей вызывает большой интерес методы и способы мониторинга территориального распространения зоны ЧС. В единой государственной информационной системе учёта научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ гражданского назначения по теме исследования приводится множество работ текущей тематики исследования. Большинство из них посвящены применению технологий космического мониторинга, систем датчиков и авиации.

Разработке комплексной системы дистанционного мониторинга [25] посвящено исследование, которое направленно на обеспечение органов государственного и муниципального управления всех уровней объективной, актуальной информацией, формируемой путем оперативной обработки и автоматизированного анализа данных дистанционного зондирования Земли в сравнении с геоданными, полученными на основании разрешительной документации. Создание системы направлено на решение задач упорядочивания контрольно-надзорной деятельности и эффективного использования, сохранения, приумножения природных ресурсов.

В исследовании [26] выполнена разработка математических моделей, позволяющих учесть показатели надежности беспилотных авиационных систем, а также всей системы мониторинга в целом. На основе, разработанных математических подходов к показателям надежности БПЛА, разработаны адаптивные методики оперативного мониторинга природных ЧС с их использованием в целях информационной поддержки оперативных штабов по тушению крупных лесных пожаров.

Проект [27] посвящён разработке физических моделей природных пожаров, такие модели играют важную роль в прогнозировании протекания ЧС и принятии решений о ликвидации ЧС. В работе определены природные факторы, определяющие закономерности процессов возникновения, развития и прекращения природных пожаров (виды, состояние, распределение по лесному массиву растительности, климатические и метеорологические условия) и являются, как правило, случайными величинами, а процессы природ-

ных пожаров представляют собой случайные функции. Это приводит к необходимости исследование процессов природных пожаров и анализ их характеристик проводить на основе методов математической статистики.

Из зарубежных проектов наибольший вклад в применение групп БПЛА в мониторинг ЧС, следует отнести проекты [28-32] Проект DARIUS [33] направлен на обеспечение беспилотных платформ необходимыми методами для поисково-спасательных операций (морской, городской, лесной сценарий), а также на повышение эффективности взаимодействия беспилотных систем на процедурном и техническом уровнях.

Интеграционный проект CRISMAC [34] сосредоточен на крупномасштабных кризисных сценариях с немедленными и расширенными человеческими, социальными, структурными и экономическими, часто необратимыми, последствиями. Как правило, эти кризисные сценарии не могут быть решены в одиночку с помощью регулярной помощи и ресурсов первых ответчиков, что требует сложного комплексного сотрудничества.

Проект AIRBEAM [35] посвящен разработке инструментария информирования о ситуации для управления критическими процессами, в том числе и ЧС, на широкой территории с использованием оптимизированного набора воздушных (не пилотируемых) платформ.

Основной целью проекта AIROBOTS [36] является проектирование платформы и разработка прототипов антенн, отвечающих основным инженерным принципам с точки зрения расширяемости и гибкости применения БПЛА.

В документе [37] представлены предварительные результаты летных испытаний для мониторинга предписанного пожара с использованием БПЛА KНawк с неподвижным крылом, включая обнаружение и анализ эволюции линии возгорания.

Несмотря на хорошие результаты многие исследования указывают на возрастающую сложность принятия решения [38] при использовании БПЛА при ЧС. В статье рассматривается эргатическая система управления беспилотными летательными аппаратами (БПЛА) в условиях парирования нештатных ситуаций. Предлагается подход к классификации нештатных ситуаций на основе формализма мультимножеств.

В статье [39] предлагается оптимальное планирование траектории БПЛА для спасения лесных пожаров на основе алгоритма поиска вихрей (VS), при этом рельеф местности описан с помощью кубической интерполяции. В исследовании [40] изучается проблема аварийной маршрутизации для лесного пожара с целью свести к минимуму общее расстояние перемещения всех спасательных команд, чтобы можно было эффективно распознать лесной пожар.

Метод направлен на разработку оптимальных маршрутов пожаротушения для множества очагов возгорания с приоритетными уровнями.

Текущий литературный обзор можно охарактеризовать как описание технологий, для применения БПЛА в мониторинге зон ЧС. Однако данный вопрос должен затрагивать еще и вопросы масштабированной системы.

Недостаток применения БПЛА заключается в текущем этапе развития систем управления. Для управления БПЛА в зоне ЧС требуется оператор, а использование систем мониторинга зон ЧС группами БПЛА количеством от 10 элементов в полностью автономном режиме не является возможным в связи с ограничениями и текущим состоянием развития технологии, не говоря об автоматической обработке данных от всех элементов группы и прогнозировании ЧС.

Развитие систем мониторинга территориального распространения зоны ЧС на основе использования группы БПЛА соответствует стратегии научно-технологического развития Российской Федерации в части перехода к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, роботизированным системам, новым материалам и способам конструирования, создания систем обработки больших объемов данных, машинного обучения и искусственного интеллекта согласно Указа Президента Российской

Федерации от 01.12.2016 г. № 642 «О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации» [41].

Использование групп БПЛА для получения точной управленческой информации о состоянии территорий (мониторинг экологической обстановки; обнаружение пожаров и других чрезвычайных ситуаций, мониторинг пострадавших зон отражено в Национальной технологической инициативе по распределенным системам беспилотных летательных аппаратов АЭРОНЕТ. План мероприятий («дорожная карта») «Аэронет» Национальной технологической инициативы [42].

Мониторинг территориального распространения зоны ЧС группой БПЛА заключается в сборе и поддержании в актуальном состоянии тематических карт, характеризующих состояние окружающей среды на границе области ЧС.

Таким образом, основные требования, предъявляемые к процессу мониторинга, заключаются в следующем:

- необходимо обеспечить полное перекрытие границы зоны ЧС тематическими картами, специфичными для данного вида ЧС;

- время с последнего обновления любого фрагмента каждой из карт $M_1, M_2, \dots, M_{n_M}$ не должно превышать заданных пороговых значений $t_{1max}, t_{2max}, \dots, t_{n_Mmax}$ соответственно.

Обсуждение результатов. Для применения групп БПЛА для мониторинга зон лесных пожаров предлагается использовать следующий алгоритм (рис. 2). Данный алгоритм рассматривает вопросы и возможности применения групп БПЛА для мониторинга зон лесных пожаров, и отражает области, исследования в которых необходимо сосредоточить для применения предлагаемой системы.

1. На основе данных спутниковых и наземных систем обнаружения ЧС выполняется первичная оценка границы области ЧС. Входные данные о возникновении зоны ЧС могут регистрироваться различными способами, среди которых можно выделить: для пожаров – спутниковое наблюдение, данные с контактных вышек или данные визуального наблюдения. В большинстве случаев используются аппаратно-программные комплексы мониторинга природных и техногенных угроз [42]. Выполняется построение модели распространения зоны ЧС. На вход поступают тематические карты, вычисляется периметр P_0 зоны ЧС.
2. Определяется начальный размер группы БПЛА $n_{БПЛА}$:

$$n_{БПЛА} = \left\lceil \frac{k_n P_0}{2r_{БПЛА}} \right\rceil,$$

где $r_{БПЛА}$ – радиус обзора БПЛА;

k_n – коэффициент избыточности, значение которого выбрано исходя из результатов экспериментальных исследований.

Формируется перекрытие периметра области ЧС, на основе которого составляется полетное задание для группы БПЛА, направленное на первичный сбор тематических карт прилегающей к зоне ЧС территории и самой области ЧС (при наличии возможности безопасного перемещения БПЛА над областью ЧС).

Для мониторинга зоны ЧС группой БПЛА необходим расчет и кратковременный прогноз развития зоны ЧС для определения координат и площади мониторинга зоны ЧС. Формируется динамический контур зоны ЧС, который в дальнейшем уточняется при проведении мониторинга группой БПЛА. Отмечаются критически важные объекты инфраструктуры в зоне ЧС или в ближайшей окрестности, для постановки задач анализа этих объектов. Отмечается зона поиска пропавших людей и зоны для получения дополнительных данных о зоне ЧС.

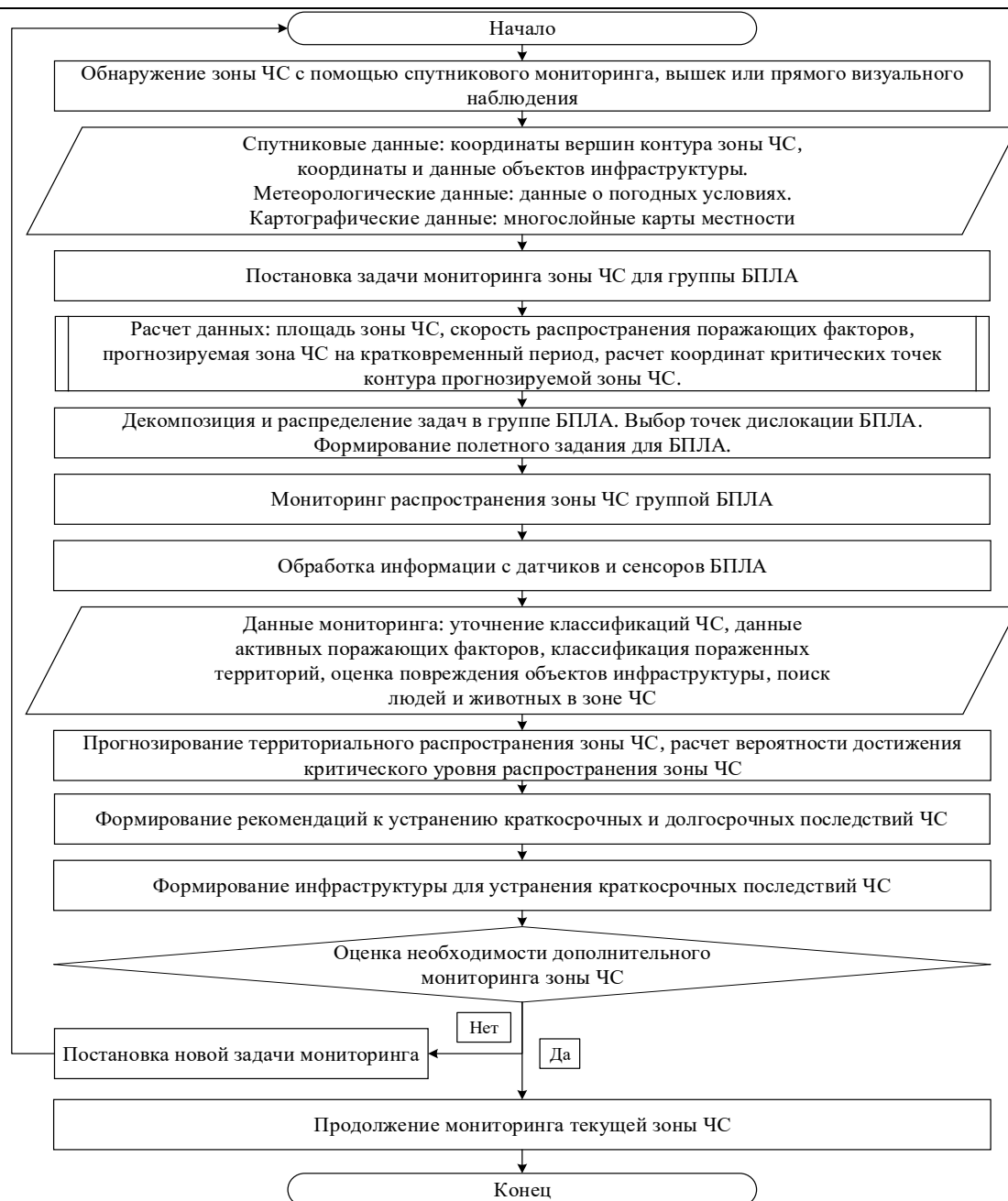


Рис. 2. Алгоритм мониторинга зоны ЧС элементами группы БПЛА

Fig.2. Algorithm for monitoring the emergency zone by elements of the UAV group

Исходя из этих данных, производится расчёт необходимого числа БПЛА для выполнения задачи мониторинга зоны ЧС:

1. Производится декомпозиция задач мониторинга на 3-х уровнях управления: управляющий пункт (централизованное постановка задач мониторинга), группа БПЛА (децентрализованное распределение задач внутри группы БПЛА, формирование полетного задания для мониторинга отобранных координат элементом группы БПЛА).
2. После декомпозиции задач мониторинга выполняется первичное полетное задание группой БПЛА, после чего производится более точная оценка периметра области ЧС P_t в текущий момент времени t .
3. При выполнении первичного полетного задания выполняется группа побочных задач мониторинга $T_D = \{T_1, T_2, \dots, T_{n_T}\}$, поиск пострадавших, наведение наземных групп ликвидации последствий ЧС, оценка объектов инфраструктуры, взятие проб и анализ окружающей среды, поиск критических точек ЧС и др.

4. Выполняется прогнозирование распространения зоны ЧС.
5. Определяется средняя скорость $v_{j,t}$ перемещения соответствующей точки границы области ЧС в момент времени t .
6. Определяется максимальная скорость $v_{max} = \max\{v_{j,t}\}$ распространения области ЧС. Вычисляется первичное значение периода сбора данных

$$i. T = \frac{k_t v_{БПЛА} r_{БПЛА}}{v_{max} P},$$

где $v_{БПЛА}$ – средняя скорость перемещения БПЛА (м/с); $k_t = (с)$ – масштабный коэффициент, значение которого получено в результате экспериментальных исследований.

7. До поступления команды окончания мониторинга выполняются следующие действия:
 - Производится прогнозирование периметра области ЧС в момент $t + T$.
 - На основе результатов прогнозирования формируется перекрытие предполагаемого периметра в момент $t + T$, в соответствии с которым составляется новое полетное задание с целью обновления существующих и формирования новых тематических карт.
 - Выполняется сравнение результатов прогнозирования с реальным периметром области ЧС в момент $t + T$. Производится корректировка (дообучение) подсистемы прогнозирования.
 - Производится перерасчет значения $n_{БПЛА}$. При необходимости даются команды вылета новых БПЛА.
 - Производится перерасчет значения T . В течение данного времени новых полетных заданий не выдается.
8. После окончания мониторинга командный центр отправляет БПЛА команды возвращения на пункты базирования.

После обработки данных с датчиков и сенсоров БПЛА производится прогнозирование территориального распространения зоны ЧС. Изучается вероятность достижения критического распространения зоны ЧС. Информационно-аналитическая система передает информацию в систему поддержки принятия решений для составления дальнейших рекомендаций по проведению мероприятий для ликвидации краткосрочных и долгосрочных последствий ЧС. Также принимается решение о необходимости продолжения мониторинга и использовании БПЛА в качестве элементов формирования инфраструктуры для устранения последствий ЧС.

По выполнению поставленных задач элементы группы БПЛА возвращаются на стартовые площадки, где проводится подготовка для применения в следующих оперативных мероприятиях.

Предлагаемый алгоритм может быть реализован при условии развития теории роевого управления. Для применения группы БПЛА для мониторинга зоны ЧС необходимо решить ряд классических задач, относящихся к проблемам роевого управления:

- реализация систем декомпозиции и распределения задач при выполнении операций роем БПЛА;
- реализация методов коллективного принятия решений для организации децентрализованного управления и распределения задач в группе БПЛА;
- реализации методов обработки информации с групп БПЛА для прогнозирования развития ЧС;
- реализация алгоритмов оценки эффективности управления роем БПЛА при выполнении задач мониторинга зон ЧС.

Вывод. В работе приведен алгоритм мониторинга динамической зоны распространения лесных пожаров группой беспилотных летательных аппаратов. В работе рассмотрены вопросы применения БПЛА для мониторинга лесных пожаров. Проведено сравнение методов мониторинга лесных пожаров, по результатам которых можно сделать вывод об

актуальности применения БПЛА для выполнения данных задач. Приведен алгоритм применения роев БПЛА для мониторинга зон лесных пожаров.

В обсуждении приведены актуальные вопросы развития теории роевого управления для реализации системы мониторинга лесных пожаров группами БПЛА, среди которых можно выделить реализацию систем декомпозиции и распределения задач при выполнении операций роем БПЛА; методов коллективного принятия решений для организации децентрализованного управления и распределения задач в группе БПЛА; реализации методов обработки информации с групп БПЛА для прогнозирования развития ЧС; реализация алгоритмов оценки эффективности управления роем БПЛА при выполнении задач мониторинга зон ЧС.

Библиографический список:

1. Laszlo B., Agoston R., Xu Q. Conceptual Approach of Measuring the Professional and Economic Effectiveness of Drone Applications Supporting Forest fire Management // *Procedia Eng.* Elsevier Ltd, 2018. Vol. 211. P. 8–17.
2. Карта пожаров – СКАНЭКС [Электронный ресурс]. URL: <http://www.scanex.ru/cloud/karta-pozharov/> (дата обращения: 14.08.2020).
3. Мониторинг зоны ЧС – Беспилотные системы [Электронный ресурс]. URL: <https://unmannedsystems.ru/examples/monitoring-zony-chs/> (дата обращения: 14.08.2020).
4. В.В. Татарин, А.Н. Калайдов, Э. Муйкич. Применение беспилотных летательных аппаратов для получения информации о природных пожарах // Интернет-журнал “Технологии техносферной безопасности” Выпуск № 1 (71), 2017 г.
5. МСЧ РФ / Главная / Главное управление / Силы и средства / Федеральные силы и средства / Беспилотная авиация [Электронный ресурс]. URL: <https://29.mchs.gov.ru/glavnoe-upravlenie/sily-i-sredstva/federalnye-sily-i-sredstva/bespilotnaya-aviaciya> (дата обращения: 14.08.2020).
6. DJI - The World Leader in Camera Drones/Quadcopters for Aerial Photography [Электронный ресурс]. URL: <https://www.dji.com/> (дата обращения: 14.08.2020).
7. Беспилотные системы – «Компания ООО «Беспилотные системы» была создана как специализированное подразделение Группы Компаний “Традиция”, занимающееся проектированием и производством беспилотных авиационных комплексов, технических средств полезной нагрузки БЛА и систем мониторинга и управления безопасностью. [Электронный ресурс]. URL: <https://unmannedsystems.ru/> (дата обращения: 14.08.2020).
8. Walkera official website - Walkera-Intelligence makes it possible [Электронный ресурс]. URL: <https://www.walkera.com/> (дата обращения: 14.08.2020).
9. XDynamics - Drone & UAV Maker in Hong Kong [Электронный ресурс]. URL: <https://www.xdynamics.com/> (дата обращения: 14.08.2020).
10. Aeronos - Home [Электронный ресурс]. URL: <https://www.aeronos.com/> (дата обращения: 14.08.2020).
11. Intel | Data Center Solutions, IoT, and PC Innovation [Электронный ресурс]. URL: <https://www.intel.com/content/www/us/en/homepage.html> (дата обращения: 14.08.2020).
12. Cyberhawk [Электронный ресурс]. URL: <https://thecyberhawk.com/> (дата обращения: 14.08.2020).
13. Aerodyne [Электронный ресурс]. URL: <https://aerodyne.group/en/> (дата обращения: 14.08.2020).
14. TOP - Terra Drone | Global UAV company [Электронный ресурс]. URL: <https://www.terra-drone.net/global/> (дата обращения: 14.08.2020).
15. СТИЛСОФТ [Электронный ресурс]. URL: <https://stilsoft.ru/> (дата обращения: 14.08.2020).
16. Home - Martek Aviation [Электронный ресурс]. URL: <https://www.martekuas.com/> (дата обращения: 14.08.2020).
17. Commercial Drone 3D Mapping Software & Analytics | Identified Technologies [Электронный ресурс]. URL: <https://www.identifiedtech.com/> (дата обращения: 14.08.2020).
18. Autonomous drone european leader - Home - Azur Drones [Электронный ресурс]. URL: <https://www.azurdrones.com/> (дата обращения: 14.08.2020).
19. Australian UAV | Drone Aerial Mapping, Survey and Inspection [Электронный ресурс]. URL: <https://www.auav.com.au/> (дата обращения: 14.08.2020).
20. Drone Companies – Canada – UAV Services | The Sky Guys [Электронный ресурс]. URL: <https://theskyguys.ca/> (дата обращения: 14.08.2020).
21. ГИС технологии: интеграция геоинформационных систем - Совзонд [Электронный ресурс]. URL: <https://sovzond.ru/> (дата обращения: 14.08.2020).
22. ГК Геоскан Беспилотные технологии для профессионалов Geoscan производитель беспилотников в России [Электронный ресурс]. URL: <https://www.geoscan.aero/ru> (дата обращения: 14.08.2020).
23. Беспилотники - Авиация - МЧС России [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mchs.gov.ru/ministerstvo/uchrezhdeniya-mchs-rossii/spasatelnye->

- podrazdeleniya/aviaciya/bespilotniki (дата обращения: 14.08.2020).
24. Мониторинг зоны ЧС – Беспилотные системы [Электронный ресурс]. URL: <https://unmannedsystems.ru/examples/monitoring-zony-chs/> (дата обращения: 14.08.2020).
 25. Разработка комплексной системы дистанционного мониторинга [Электронный ресурс]. URL: <https://www.rosrid.ru/nioctr/Zl7mekgxbc5ehgl6zlxddjbt> (дата обращения: 14.08.2020).
 26. Разработка методики оперативного мониторинга природных ЧС с использованием беспилотных авиационных систем в целях информационной поддержки оперативных штабов по тушению крупных лесных пожаров [Электронный ресурс]. URL: <https://www.rosrid.ru/nioctr/rwrjdva9jcs5hw8ljnimswwd> (дата обращения: 14.08.2020).
 27. Физико-математическое моделирование возникновения природных пожаров. – Томск: Издательский Дом Томского государственного университета, 2014. – 276 с.
 28. Chrobocinski P. et al. DARIUS project: Deployable SAR integrated chain with unmanned systems // 2012 International Conference on Telecommunications and Multimedia, TEMU 2012. 2012. P. 220–226.
 29. Modelling crisis management for improved action and preparedness [Электронный ресурс]. URL: <https://pdfslide.net/documents/modelling-crisis-management-for-improved-action-and-preparedness.html> (дата обращения: 14.08.2020).
 30. AIRBEAM - AIRborne information for Emergency Awareness and Monitoring | Indra [Электронный ресурс]. URL: <https://www.indracompany.com/en/indra/airbeam-airborne-information-emergency-situation-awareness-monitoring> (дата обращения: 14.08.2020).
 31. Alamouri A. et al. The joint research project ankommen-exploration using automated uav and ugv // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives. International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2019. Vol. 42, № 2/W13. P. 165–172.
 32. WAAS – глобальная система дифференциальных поправок. Система EGNOS в России. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.gps-profi.ru/waas-gpsportal.php> (дата обращения: 14.08.2020).
 33. Chrobocinski P. et al. DARIUS project: Deployable SAR integrated chain with unmanned systems // 2012 International Conference on Telecommunications and Multimedia, TEMU 2012. 2012. P. 220–226.
 34. Modelling crisis management for improved action and preparedness [Электронный ресурс]. URL: <https://pdfslide.net/documents/modelling-crisis-management-for-improved-action-and-preparedness.html> (дата обращения: 14.08.2020).
 35. AIRBEAM - AIRborne information for Emergency Awareness and Monitoring | Indra [Электронный ресурс]. URL: <https://www.indracompany.com/en/indra/airbeam-airborne-information-emergency-situation-awareness-monitoring> (дата обращения: 14.08.2020).
 36. Alamouri A. et al. The joint research project ankommen-exploration using automated uav and ugv // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives. International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2019. Vol. 42, № 2/W13. P. 165–172.
 37. Gowravaram S. et al. Prescribed fire monitoring using KHawk unmanned aircraft systems: Initial flight test results // AIAA Information Systems-AIAA Infotech at Aerospace, 2018. American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc, AIAA, 2018. № 209989.
 38. Бурый А.С., Шевкунов М.А. Подход к построению систем поддержки принятия решений при управлении беспилотными летательными аппаратами // ТДР. 2015. №6. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/podhod-k-postroeniyu-sistem-podderzhki-prinyatiya-resheniy-pri-upravlenii-bespilotnymi-letatelnyimi-apparatami> (дата обращения: 16.03.2021).
 39. Wang C. et al. The Adaptive Vortex Search Algorithm of Optimal Path Planning for Forest Fire Rescue UAV // Proceedings of 2018 IEEE 3rd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference, IAEAC 2018. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2018. P. 400–403.
 40. Fang Y., Deng Y., Zhou Z. Formulation and solution of an emergency routing problem for forest fire with priority areas // Proceedings of the 2019 International Conference on Industrial Engineering and Systems Management, IESM 2019. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019.
 41. Указ Президента РФ от 01.12.2016 N 642 “О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации” / КонсультантПлюс [Электронный ресурс]. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_207967/ (дата обращения: 14.08.2020).
 42. Нормативные дорожные карты [Электронный ресурс]. URL: https://nti2035.ru/documents/Normative_road_maps/ (дата обращения: 14.08.2020).

References:

1. Laszlo B., Agoston R., Xu Q. Conceptual Approach of Measuring the Professional and Economic Effectiveness of Drone Applications Supporting Forest fire Management // Procedia Eng. Elsevier Ltd, 2018. Vol. 211. P. 8-17.
2. Map of fires - ScanEx [Electronic resource]. URL: <http://www.scanex.ru/cloud/karta-pozharov/> (date of ac-

-
- cess: 14.08.2020).
3. Monitoring of the emergency zone - Unmanned systems [Electronic resource]. URL: <https://unmannedsystems.ru/examples/monitoring-zony-chs/> (date accessed: 14.08.2020).
 4. V.V. Tatarinov, A.N. Kalaydov, E. Muikich. The use of unmanned aerial vehicles for obtaining information about wildfires. *Internet journal "Technosphere Safety Technologies"* 2017; 1 (71) [In Russ]
 5. Medical unit of the Russian Federation / Main / Main administration / Forces and means / Federal forces and means. *Unmanned aviation* [Electronic resource]. URL: <https://29.mchs.gov.ru/glavnoe-upravlenie/sily-i-sredstva/federalnye-sily-i-sredstva/bespilotnaya-aviaciya> (date accessed: 14.08.2020). [In Russ]
 6. DJI - The World Leader in Camera Drones / Quadcopters for Aerial Photography [Electronic resource]. URL: <https://www.dji.com/> (date of access: 14.08.2020).
 7. Unmanned systems - "Unmanned Systems LLC" was established as a specialized subdivision of the Tradition Group of Companies engaged in the design and manufacture of unmanned aerial systems, UAV payload hardware and safety monitoring and control systems. [Electronic resource]. URL: <https://unmannedsystems.ru/> (date of access: 14.08.2020). [In Russ]
 8. Walkera official website - Walkera – Intelligence makes it possible [Electronic resource]. URL: <https://www.walkera.com/> (date accessed: 14.08.2020).
 9. XDynamics - Drone & UAV Maker in Hong Kong [Electronic resource]. URL: <https://www.xdynamics.com/> (date accessed: 14.08.2020).
 10. Aeronos - Home [Electronic resource]. URL: <https://www.aeronos.com/> (date accessed: 14.08.2020).
 11. Intel Data Center Solutions, IoT, and PC Innovation [Electronic resource]. URL: <https://www.intel.com/content/www/us/en/homepage.html> (date accessed: 14.08.2020).
 12. Cyberhawk [Electronic resource]. URL: <https://thecyberhawk.com/> (date accessed: 14.08.2020).
 13. Aerodyne [Electronic resource]. URL: <https://aerodyne.group/en/> (date of access: 14.08.2020).
 14. TOP - Terra Drone Global UAV company [Electronic resource]. URL: <https://www.terra-drone.net/global/> (date accessed: 14.08.2020).
 15. STILSOFT [Electronic resource]. URL: <https://stilsoft.ru/> (date of access: 14.08.2020). [In Russ]
 16. Home - Martek Aviation [Electronic resource]. URL: <https://www.martekuas.com/> (date accessed: 14.08.2020).
 17. Commercial Drone 3D Mapping Software & Analytics Identified Technologies [Electronic resource]. URL: <https://www.identifiedtech.com/> (date accessed: 14.08.2020).
 18. Autonomous drone european leader - Home - Azur Drones [Electronic resource]. URL: <https://www.azurdrones.com/> (date accessed: 14.08.2020).
 19. Australian UAV Drone Aerial Mapping, Survey and Inspection [Electronic resource]. URL: <https://www.auav.com.au/> (date accessed: 14.08.2020).
 20. Drone Companies - Canada - UAV Services The Sky Guys [Electronic resource]. URL: <https://theskyguys.ca/> (date accessed: 14.08.2020).
 21. GIS technologies: integration of geographic information systems - Sovzond [Electronic resource]. URL: <https://sovzond.ru/> (date of access: 14.08.2020). [In Russ]
 22. GC Geoscan Unmanned technologies for professionals Geoscan is a manufacturer of unmanned aerial vehicles in Russia [Electronic resource]. URL: <https://www.geoscan.aero/ru> (date accessed: 14.08.2020). [In Russ]
 23. Unmanned aerial vehicles - Aviation - EMERCOM of Russia [Electronic resource]. URL: <https://www.mchs.gov.ru/ministerstvo/uchrezhdeniya-mchs-rossii/spasatelnye-podrazdeleniya/aviaciya/bespilotniki> (date accessed: 14.08.2020). [In Russ]
 24. Monitoring the emergency zone - Unmanned systems [Electronic resource]. URL: <https://unmannedsystems.ru/examples/monitoring-zony-chs/> (date accessed: 14.08.2020). [In Russ]
 25. Development of an integrated remote monitoring system [Electronic resource]. URL: <https://www.rosrid.ru/nioctr/Zl7mekgxbc5ehgl6zlxddjbt> (date accessed: 14.08.2020). [In Russ]
 26. Development of a methodology for operational monitoring of natural emergencies using unmanned aircraft systems for information support of operational headquarters to extinguish large forest fires [Electronic resource]. URL: <https://www.rosrid.ru/nioctr/rwrjdva9jcs5hw8ljnimswdd> (date accessed: 14.08.2020). [In Russ]
 27. Physical and mathematical modeling of the occurrence of natural fires. - Tomsk: Publishing House of Tomsk State University, 2014; 276. [In Russ]
 28. Chrobocinski P. et al. DARIUS project: Deployable SAR integrated chain with unmanned systems. 2012 International Conference on Telecommunications and Multimedia, TEMU 2012. 2012; 220–226.
 29. Modeling crisis management for improved action and preparedness [Electronic resource]. URL: <https://pdfslide.net/documents/modelling-crisis-management-for-improved-action-and-preparedness.html> (date accessed: 14.08.2020).
 30. AIRBEAM - AIRborne information for Emergency Awareness and Monitoring | Indra [Electronic resource]. URL: <https://www.indracompany.com/en/indra/airbeam-airborne-information-emergency-situation-awareness-monitoring> (date accessed: 14.08.2020).

31. Alamouri A. et al. The joint research project ankommen-exploration using automated uav and ugv. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives. *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*, 2019; 42 (2)13: 165-172.
32. WAAS - the global system of differential corrections. EGNOS system in Russia. [Electronic resource]. URL: <http://www.gps-profi.ru/waas-gpsportal.php> (date accessed: 14.08.2020). [In Russ]
33. Chrobocinski P. et al. DARIUS project: Deployable SAR integrated chain with unmanned systems. 2012 International Conference on Telecommunications and Multimedia, TEMU 2012. 2012; 220–226.
34. Modeling crisis management for improved action and preparedness [Electronic resource]. URL: <https://pdfslide.net/documents/modelling-crisis-management-for-improved-action-and-preparedness.html> (date accessed: 14.08.2020).
35. AIRBEAM - AIRborne information for Emergency Awareness and Monitoring | Indra [Electronic resource]. URL: <https://www.indracompany.com/en/indra/airbeam-airborne-information-emergency-situation-awareness-monitoring> (date accessed: 14.08.2020).
36. Alamouri A. et al. The joint research project ankommen-exploration using automated uav and ugv. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives. *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*, 2019;42(2) / W13: 165-172.
37. Gowravaram S. et al. Prescribed fire monitoring using KHawk unmanned aircraft systems: Initial flight test results. AIAA Information Systems-AIAA Infotech at Aerospace, 2018. American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc, AIAA, 2018; 209989.
38. Brown A.S., Shevkunov M.A. Approach to the construction of decision support systems for the control of unmanned aerial vehicles. TDR. 2015. No. 6. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/podhod-k-postroeniyu-sistem-podderzhki-prinyatiya-resheniy-pri-upravlenii-bespilotnymi-letatelnyimi-apparatami> (date of access: 16.03.2021).
39. Wang C. et al. The Adaptive Vortex Search Algorithm of Optimal Path Planning for Forest Fire Rescue UAV. Proceedings of 2018 IEEE 3rd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference, IAEAC 2018. *Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.*, 2018;400–403 .
40. Fang Y., Deng Y., Zhou Z. Formulation and solution of an emergency routing problem for forest fire with priority areas. Proceedings of the 2019 International Conference on Industrial Engineering and Systems Management, *IESM 2019. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.*, 2019.
41. Decree of the President of the Russian Federation of 01.12.2016 N 642 "On the Strategy of Scientific and Technological Development of the Russian Federation" .ConsultantPlus [Electronic resource]. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_207967/ (date accessed: 14.08.2020).
42. Regulatory road maps [Electronic resource]. URL: https://nti2035.ru/documents/Normative_road_maps/ (date accessed: 14.08.2020). [In Russ]

Сведения об авторах:

Тебеева Фариза Биляловна, доктор физико-математических наук, доцент, заведующая кафедрой компьютерной безопасности; ftbueva@ncfu.ru; ORCID 0000-0002-7373-4692

Владимир Олегович Антонов, кандидат технических наук, доцент кафедры компьютерной безопасности Института цифрового развития; ant.vl.02@gmail.com; ORCID 0000-0001-8264-9409

Михаил Юрьевич Кабиняков, соискатель; micsys@gmail.com; ORCID 0000-0003-1131-6687

Николай Юрьевич Свистунов, ассистент кафедры компьютерной безопасности Института цифрового развития; svistunovn4@gmail.com; ORCID 0000-0002-3277-1120

Information about the authors:

Fariza B. Tebueva, Dr. Sci.(Physics and Mathematics), Assoc. Prof., Head of the Department of Computer Security; ftbueva@ncfu.ru; ORCID 0000-0002-7373-4692

Vladimir O. Antonov, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Department of Computer Security; ant.vl.02@gmail.com. ; ORCID 0000-0001-8264-9409

Mikhail Yu. Kabinyakov, Applicant; micsys@gmail.com; ORCID 0000-0003-1131-6687

Nikolay Yu. Svistunov, Assistant of the Department of Computer Security of the Institute of Digital Development; svistunovn4@gmail.com; ORCID 0000-0002-3277-1120

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/ Received 06.12.2022.

Одобрена после рецензирования/ Reviced 10.01.2023.

Принята в печать/ Accepted for publication 10.01.2023.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 004.94

DOI: 10.21822/2073-6185-2023-50-1-152-160

Оригинальная статья /Original Paper

Виртуальный испытательный стенд для компьютерного проектирования барабанных сушилок по кинетическим закономерностям процесса сушки

В.В. Ткач, А.А. Шевцов

Военный учебно–научный центр Военно–воздушных сил «Военно–воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»,
394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54а, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является создание виртуального испытательного стенда, состоящего из оптимальных конструктивных параметров, обеспечивающих максимальное приближение реального процесса сушки к экспериментальным данным. **Метод.** Применены методы моделирования, формализованного описания, оптимального проектирования и управления технологическими процессами и производствами. **Результат.** Разработан виртуальный испытательный стенд, позволяющий в режиме реального времени определять конструктивные параметры сушилок барабанного типа в зависимости от кинетических закономерностей процесса сушки различных зерновых культур. В качестве объекта исследования использована конструкция двухсекционной барабанной сушилки, каждая секция которой снабжена профильной канальной насадкой, обеспечивающей поперечную подачу сушильного агента через пересыпающийся подвижный слой высушиваемого дисперсного продукта. Приведен алгоритм расчета процесса сушки, позволяющий определять поля температур и влагосодержаний зерна в широком диапазоне режимных параметров. С применением САПР выполнена компьютерная модель данной установки с возможностью автономного вращения и перемещения барабанов относительно друг друга. Составлена схема синхронизированной работы подвижных элементов установки в условиях оперативной перенастройки ее конструкции в соответствии с изменениями кинетических кривых. **Вывод.** Виртуальный испытательный стенд достаточно адекватно и с высокой точностью позволяет моделировать процесс сушки материалов в барабанной сушилке; позволяет апробировать работу барабанной сушилки на стадии разработки, провести эксперименты с максимально высокой точностью, подобрать оптимальные режимы сушки для различных материалов при минимальных энергозатратах.

Ключевые слова: испытательный стенд, компьютерное моделирование, барабанная сушилка, теплоноситель, сушка

Для цитирования: В.В. Ткач, А.А. Шевцов. Виртуальный испытательный стенд для компьютерного проектирования барабанных сушилок по кинетическим закономерностям процесса сушки. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023; 50(1):152-160. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-1-152-160

Virtual test bench for computer-aided design of drum dryers based on kinetic laws of the drying process

V.V. Tkach, A.A. Shevtsov

Military Training and Research Center Air force «The Air Force Academy named after professor N.E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin»,
54a, Stary Bolsheviks Str., Voronezh 394064, Russia

Abstract. The aim of the study is to create a virtual test bench, consisting of optimal design parameters that provide the maximum approximation of the real drying process to the experimental data. **Method.** Methods of modeling, formalized description, optimal design and management of technological processes and productions are applied. **Result.** A virtual test bench has

been developed that allows real-time determination of the design parameters of drum-type dryers depending on the kinetic patterns of the drying process of various grain crops. As an object of study, the design of a two-section drum dryer was used, each section of which is equipped with a profile channel nozzle that provides a transverse supply of the drying agent through the pouring movable layer of the dispersed product to be dried. An algorithm for calculating the drying process is presented, which makes it possible to determine the fields of temperature and moisture content of grain in a wide range of regime parameters. With the use of CAD, a computer model of this installation was made with the possibility of autonomous rotation and movement of the drums relative to each other. A diagram of the synchronized operation of the moving elements of the installation under conditions of operational reconfiguration of its design in accordance with changes in the kinetic curves has been drawn up. **Conclusion.** The presented virtual test stand adequately and with high accuracy allows simulating the process of drying materials in a drum dryer; allows you to test the operation of a drum dryer at the development stage, conduct experiments with the highest possible accuracy, select the optimal drying modes for various materials with minimal energy consumption.

Keywords: test bench, computer simulation, drum dryer, heat carrier, drying

For citation: V.V. Tkach, A.A. Shevtsov. Virtual test bench for computer-aided design of drum dryers based on kinetic laws of the drying process. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science. 2023; 50(1):152-160. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-1-152-160

Введение. Наличие в современном мире большого количества систем автоматизированного проектирования (САПР) позволяет не только разрабатывать различные механизмы и устройства, но и производить отладку работы на стадии моделирования, заменить натурные испытания виртуальными, заранее выявить все недостатки будущего оборудования, спрогнозировать поведение его узлов и агрегатов при различных нагрузках и режимах работы. Все это позволит повысить качество и технику – экономический уровень результатов проектирования, подобрать оптимальные режимы работы с получением продукта высокого качества [1 – 5].

Постановка задачи. Необходимость создания виртуального испытательного стенда заключалась в поиске оптимальных конструктивных параметров, обеспечивающих максимальное приближение реального процесса сушки к экспериментальным данным, полученным на основе изучения его кинетических закономерностей, которые в данном случае представлены кривой сушки, полученной при рациональном режиме.

Данная задача рассматривается относительно техники и технологии сушки зерновых культур [6 – 10]. При этом актуальность вопроса связана как с сохранением урожая, так и со снижением энергетических затрат на единицу массы высушенного зерна.

Методы исследования. Объектом проектирования являлась зерносушилка с двумя вращающимися, независимыми барабанами (рис.1). Основное достоинство сушилки в том, что во вращающихся барабанах установлена профильная канальная насадка. Достоинство которой заключается в рациональном использовании потенциала сушильного агента, так как он подается только в те щели насадки, над которыми находится слой сыпучего материала.

Сушилка содержит загрузочное устройство 1, первый барабан 2, канальную насадку 3, второй барабан 4, канальную насадку 5, патрубок подвода теплоносителя 6, опорные ролики 7, привод 8, неподвижные фланцы 9 – 10, патрубок подвода теплоносителя 11, гофрированный рукав 12, опорную плиту 13, опорные ролики 14, привод 15, механизм горизонтального перемещения 16, привод 17, опору с роликами 18, разгрузочная камеру 19, патрубок отвода отработанного теплоносителя 20, диафрагму 21 – 22. Сушилка работает следующим образом. Через загрузочное устройство 1 материал подается в первый барабан 2, приводимый по вращению приводом 8, и продувается теплоносителем через канальную насадку 3, поступающим по патрубку подвода теплоносителя 6. Высушиваясь, и заполнив

первый барабан 2 через диафрагму 21 материал поступает, во второй барабан 4, приводимый во вращение приводом 15, где обдувается теплоносителем через канальную насадку 5, подводимым через патрубок подвода теплоносителя 11 с гофрированным рукавом 12. Через диафрагму 22 высушенный материал направляется в разгрузочную камеру 19, откуда уже отводится на хранение.

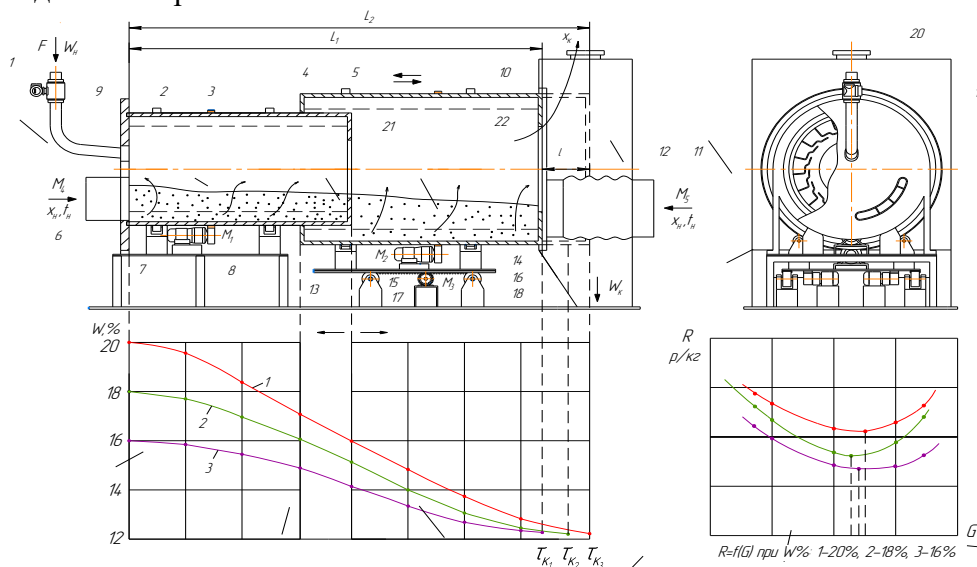


Рис. 1. Барабанная сушилка с двумя независимыми барабанами
Fig. 1. Drum dryer with two independent drum

Обеспечение горизонтального перемещения второго барабана 4 осуществляется за счет привода 17 посредством механизма горизонтального перемещения 16, установленного на опорной плите 13.

Выбор оптимальных параметров процесса сушки основан на кинетических закономерностях, отражающих изменение средней влажности материала за определенный промежуток времени с учетом форм и энергии связи влаги с материалом, его насыпной плотностью, параметрами теплоносителя, конструктивными особенностями сушильной установки [11]. Горизонтальное перемещение второго барабана дает возможность изменять объем сушилки, увеличить время пребывания материала под воздействием теплоносителя, регулировать конечную влажность материала и тем самым интенсифицировать процесс тепло – и массообмена.

Кривая сушки 1 соответствует расстоянию L_1 равному сумме длин первого и второго барабанов при нулевом перемещении второго. Кривая 2 расстоянию L_2 где отражается перемещение второго барабана, где l – максимально возможный ход. Изменение режимов процесса обезвоживания материала влечет за собой как снижение, так и увеличение суммарных энергозатрат на один килограмм испаренной влаги. Правильный подбор режимов, при которых они будут минимальными, является первоочередной задачей (рис.1).

Обсуждение результатов. Для создания виртуального испытательного стенда выполнены экспериментальные исследования, которые позволяют найти однозначную функциональную связь между геометрическими параметрами сушилки и технологическими режимами процесса сушки.

Установлено, что в процессе сушки при различных значениях скорости и температуры сушильного агента, степени заполнения барабана для вертикальных сечений, расположенных по длине сушилки на разных расстояниях от загрузочного устройства, экспериментальные кривые сушки носят экспоненциальный характер и к концу асимптотически приближаются к установившемуся значению равновесной влажности W_p . Поэтому в качестве аппроксимирующей функции было использовано уравнение А.В. Лыкова для второго периода сушки [12]:

$$\frac{W - W_p}{W_H - W_p} = \exp(-kt) \quad (1)$$

Эмпирическая модель кинетики сушки зерна пшеницы:

$$\frac{W-W_p}{W_n-W_p} = \exp(-KT^m v^n \xi^p \tau), \quad (2)$$

где K – коэффициент сушки, m , n и p – параметры модели, τ – время.

Агрегация переменных при коэффициенте сушки K позволила определить связь текущей влажности зерна с режимом сушки.

Методом средних для зерна пшеницы определены параметры K , m , n и p , которые оказались равными: $K = -8,14 \cdot 10^{-15}$, $m = 4$, $n = 3$, $p = -3$, причем каждый из них определяет степень влияния T , v , и ξ на величину W , а формула (2) принимает вид:

$$\frac{W-W_p}{W_n-W_p} = \exp(-k\tau) - 8,14 \cdot 10^{-15} (T - 273)^5 v^2 \xi^2 \tau \quad (3)$$

Адекватность модели (3) реальному процессу проверена по χ^2 – критерию.

С учетом требований разработки технологических режимов сушки зерна пшеницы во вращающемся барабане с профильной канальной насадкой были проанализированы соотношения между температурой зерна и его влажностью. Следует заметить, что значения температуры нагрева зерна являются в известной мере условными, так как в опытах фактически измерялась не температура отдельных зерен, а температура зерновой массы или слоя.

При обработке температурных кривых зависимость, однозначно связывающая допустимую температуру нагрева зерна с его влажностью, была представлена уравнением прямой:

$$T_n = T_0 - qW, \quad (4)$$

где $T_0 = 365$ и $q = 2,88$ – эмпирические коэффициенты.

Формула (4) справедлива в интервале значений $W \in (10, 30)$.

Для расчета средних температур нагрева зерна пшеницы использовалось уравнение теплового баланса:

$$\frac{d(p_n(W, \tau) c_n(W, \tau) T_n(W, \tau))}{d\tau} = \alpha_v \left(T - T_n \cdot (W, \tau) + \frac{rd(W(\tau)/100 \cdot p_n(W, \tau))}{d\tau} \right), \quad (5)$$

где $p_n(W, \tau)$ – насыпная плотность зерна, кг/м^3 , α_v – объемный коэффициент теплообмена, $\text{кДж/с} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{К}$, r – удельная теплота испарения, кДж/кг , $c_n(W, \tau)$ – теплоемкость зерна, $\text{кДж/кг} \cdot \text{К}$.

При интегрировании уравнения (5) задавался постоянный шаг дискретизации процесса по времени Δt и весь процесс сушки разбивался на $i = (1, N)$ интервалов:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\tau_i - \tau_{i-1}} \int_{\tau_{i-1}}^{\tau_i} \frac{d(p_n(W, \tau) c_n(W, \tau) T_n(W, \tau))}{d\tau} d\tau - \frac{\alpha_v}{\tau_i - \tau_{i-1}} - \\ & - \int_{\tau_{i-1}}^{\tau_i} T d\tau - \frac{\alpha_v}{\tau_i - \tau_{i-1}} \int_{\tau_{i-1}}^{\tau_i} T_n(W, \tau) d\tau + \frac{r}{\tau_i - \tau_{i-1}} \int_{\tau_{i-1}}^{\tau_i} \frac{W(\tau)}{100} \cdot p_n(W, \tau) d\tau. \end{aligned} \quad (6)$$

Считая, что температура зерна на бесконечно малом интервале времени не изменяется, т.е.

$$T_{n_{i-1}} = \frac{1}{\tau_i - \tau_{i-1}} \int_{\tau_{i-1}}^{\tau_i} T_n(W, \tau) d\tau, \quad (7)$$

и прогнозируя температуру нагрева зерна на каждом последующем интервале времени с помощью ограничения (4), уравнение (6) после интегрирования и необходимых преобразований приведено к виду:

$$\begin{aligned} T_{n_i} = & \left[\frac{p_n(W, \tau_{i-1}) c_n(W, \tau_{i-1})}{p_n(W, \tau_i) c_n(W, \tau_i)} - \frac{\alpha_v (\tau_i - \tau_{i-1})}{p_n(W, \tau_i) c_n(W, \tau_i)} \right] \cdot \left(365 - 2,88 \frac{W(\tau_{i-1})}{100} \right) \\ & + \frac{\alpha_v T}{p_n(W, \tau_i) c_n(W, \tau_i)} + \frac{r}{p_n(W, \tau_i) c_n(W, \tau_i)} \left[\frac{W(\tau_i)}{100} p_n(W, \tau_i) - \frac{W(\tau_{i-1})}{100} p_n(W, \tau_{i-1}) \right], \end{aligned} \quad (8)$$

где теплоемкость и насыпная плотность зерна пшеницы определялись соответственно по формулам:

$$c_n(W) = \frac{0,42+0,064W-1548,8}{0,37}, \quad (9)$$

$$p_n(W) = 1388 - 3,2 \frac{W/100}{1-W/100}. \quad (10)$$

Для решения (8) с учетом (3), (9), (10) заданы начальные условия:

$$W(0) = W_n, T_n(0) = T_n^n. \quad (11)$$

Задача идентификации математической модели (3-11) реальному процессу, заключается в том, что расчетные значения температуры нагрева зерна соответствуют фактическим:

$$|T_n^{\text{расч}}(\tau) - T_n^{\text{эксп}}(\tau)| \leq \varepsilon, \quad (12)$$

где ε – некоторое положительное число, определяющее точность вычислений.

Достижение оценки (12) обеспечивалось последовательных приближений, по результатам которого среднее значение коэффициента теплообмена в процессе сушки зерна пшеницы оказалось равным 121 кДж/с·м³·К.

Для решения модели составлена компьютерная программа, которая в зависимости от начальной влажности и вида зернового продукта дает возможность проводить систематические расчеты полей температур и влагосодержания высушиваемого продукта с учетом кинетических закономерностей. Эта информация легла в основу создания виртуального испытательного стенда. Данная идеология заключалась в перенастройке габаритных размеров барабанной сушилки и изменения параметров сушильного процесса в каждом барабане. При этом выходные данные, полученные при решении процесса сушки в первом барабане являются входной информацией для решения процесса сушки во втором барабане.

При создании стенда были решены следующие задачи: выполнена компьютерная модель барабанной сушилки [13 – 16]; выполнен блок управления ее двигателями, отвечающими за вращение и перемещение барабанов, подачу теплоносителя (рис.2); представлен блок расчета параметров установки и процесса сушки; разработан пульт управления оператора с возможностью изменения, контроля входных и выходных параметров; дисплей для вывода кривых сушки в режиме реального времени.

В компьютерной модели предусмотрены: вращение первого барабана (M1), вращение второго барабана (M2), горизонтальное перемещение второго барабана (M3), подача теплоносителя в первый барабан от тепловентилятора (M4), подача теплоносителя во второй барабан от тепловентилятора (M5), регулировка степени заполнения барабанов через загрузочное устройство (F).

Для синхронизации работы модели, пульта управления и получения необходимых выходных данных применена известная и широко используемая графическая среда разработки приложений для контрольно – измерительных и вычислительных комплексов LabVIEW. Среда позволяет моделировать как отдельные объекты, так и автоматизированные системы [17 – 20].

Программы, разработанные в данной среде, называются виртуальными инструментами. Виртуальный инструмент состоит из блок – диаграммы и лицевой панели.

Передача управления от индикаторов лицевой панели к подвижным компонентам компьютерной модели осуществляется посредством блок – диаграммы, работающей в замкнутом цикле (рис.2).

В данном цикле происходит постоянный «опрос» оборудования. Вращение и движение обеспечивается блоками SoftMotion – Line. Каждый соответствует своему компоненту в модели.

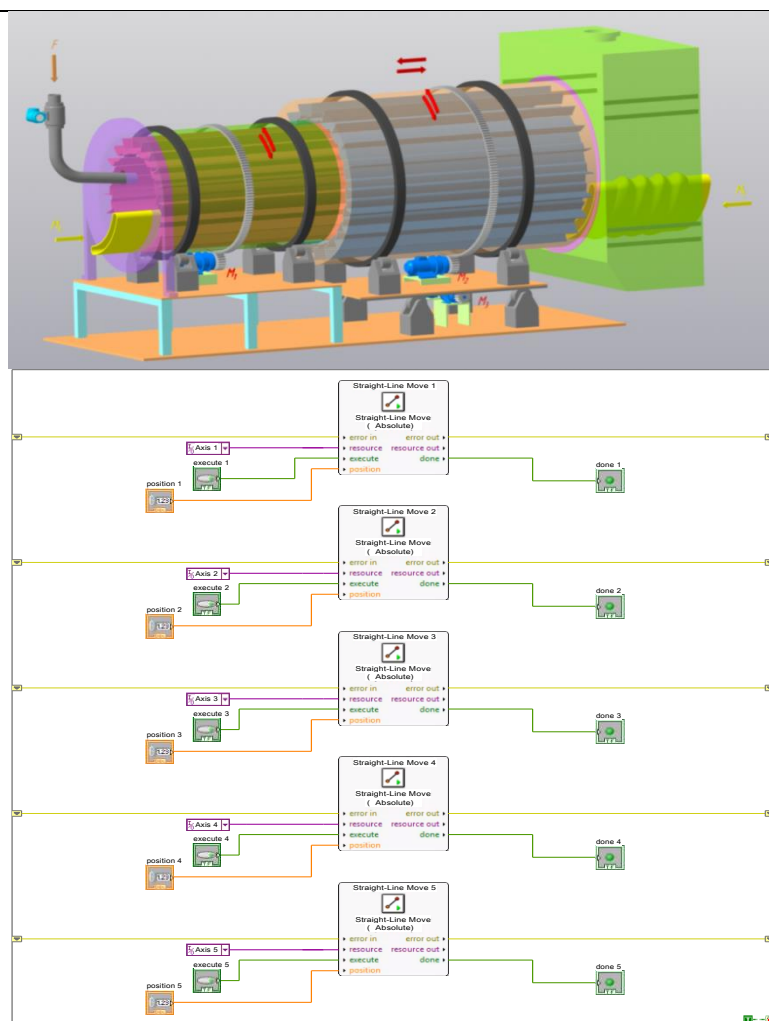


Рис. 2. Компьютерная модель барабанной сушилки с блок – диаграммой
Fig. 2. Computer model of a drum dryer with a block diagram

Принимая во внимание конструктивные особенности данной барабанной сушилки, а также специфичность сушки сыпучих материалов и их свойства разработан пульт управления, в наиболее полной мере учитывающий данные факторы (рис.3).

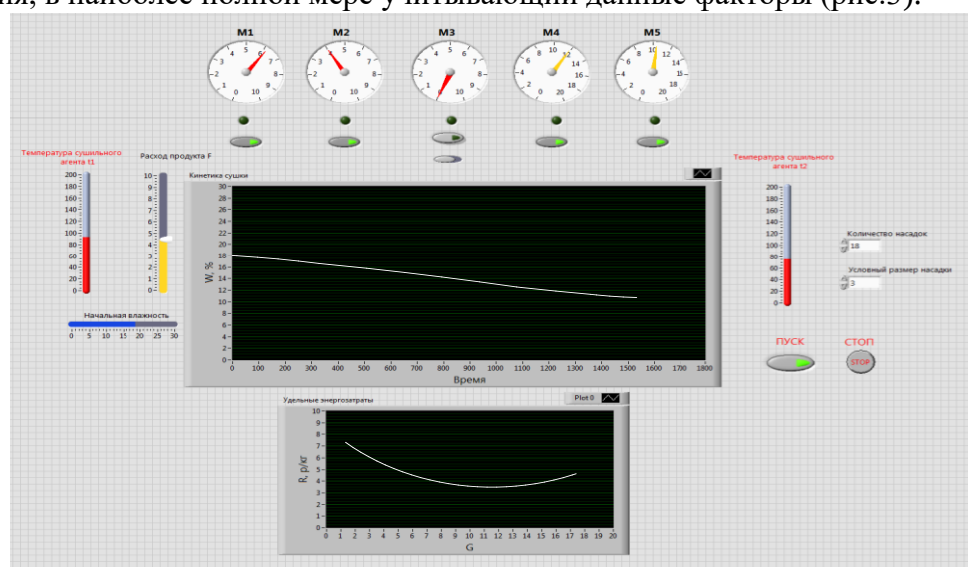


Рис. 3. Лицевая панель пульта управления
Fig. 3. Front panel of the control panel

Алгоритм работы испытательного стенда выстроен по следующему принципу (рис.4). Из имеющейся базы данных выбирается материал для сушки, где учитываются его

теплофизические, дериватографические и структурно – механические свойства. Исходя из этого, оператор на пульте управления задает следующие начальные входные данные: скорость вращения первого барабана, скорость вращения и направление перемещения второго барабана, скорость подачи теплоносителя в первый барабан, скорость подачи теплоносителя во второй барабан, температуру теплоносителей, начальную влажность материала, расход материала, количество и размер насадок. Производится пуск.

Блок расчета проводит все необходимые вычисления и незамедлительно реагирует на изменение оператором какого – либо из параметров.

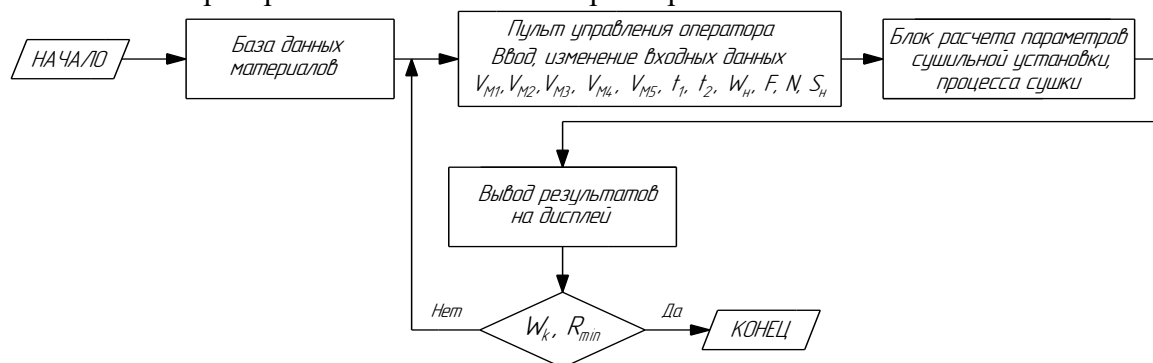


Рис. 4. Алгоритм работы испытательного стенда

Fig. 4. The algorithm of the test bench operation

Для каждой из формул, состоящих в блоке, выполнена расчетная модель с возможностью отладки ее работы (рис.5). Все формулы в блоке прописаны в виде подпрограмм, которые могут рассчитываться последовательно или параллельно.

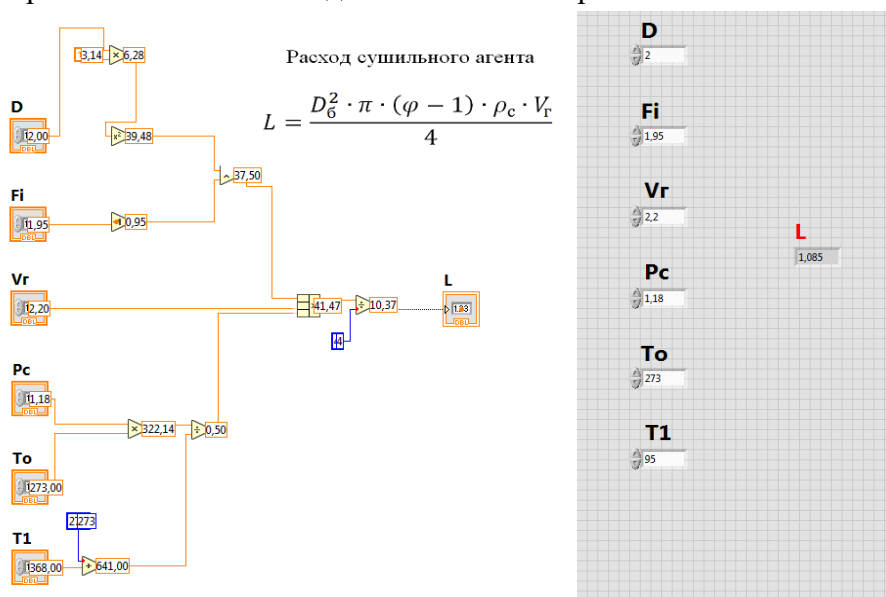


Рис. 5. Расчетная модель расхода сушильного агента

Fig. 5. Calculation model of drying agent consumption

В процессе всех вычислений на выходе получаем определяющие значения, такие как конечная влажность материала и удельные энергозатраты, выводящиеся в графическом виде на экран дисплея пульта управления в режиме реального времени и дающие представление оператору о происходящем процессе. Все результаты, полученные в ходе проведения испытаний автоматически сохраняются, где в дальнейшем могут использоваться для постановки следующих экспериментов.

Вывод. Проведенные исследования показали, что предложенный виртуальный испытательный стенд достаточно адекватно и с высокой точностью позволяет моделировать процесс сушки материалов в барабанной сушилке. Отклонение полученных результатов по сравнению со справочными данными не превышает 5 – 8 %. Время, затрачиваемое на эксперимент многократно сокращается, отсутствует необходимость в самом исследуемом

материале, достаточно знать его свойства. Быстрое внесение изменений и корректировок, а также полная замена блоков, используемых в работе стенда делает возможной его адаптацию под другие виды сушки и производственные процессы в целом с расширением круга выполняемых задач.

Стенд позволит апробировать работу барабанной сушилки на стадии разработки, провести эксперименты с максимально высокой точностью, подобрать оптимальные режимы сушки для различных материалов при минимальных энергозатратах. Дает возможность провести модельные эксперименты с учетом опасных и критических ситуаций, что в большинстве случаев невозможно при работе с настоящим оборудованием.

Библиографический список:

1. Норенков И.П. Автоматизированное проектирование: учеб. пособие / И.П. Норенков. – Москва, 2000 – 188 с.
2. Нестеренко Е.С. Основы систем автоматизированного проектирования [Электронный ресурс]: электрон. конспект лекций /Е. С Нестеренко; Минобрнауки России, Самар. гос. аэрокосм. ун – т им. С.П. Королева (нац. исслед. ун – т) Электрон. текстовые и граф. дан. (0,31 Мбайт). – Самара, 2013.
3. Кондаков А.И. САПР технологических процессов: учебник для студ. высш. учеб. заведений / А.И. Кондаков. – М.: Издательский центр «Академия», 2007. – 272 с.
4. Ли К. Основы САПР (CAD, CAM, CAE). – СПб.: Питер, 2004. – 560 с.: ил.
5. Зуев С.А. САПР на базе AutoCAD – как это делается. – СПб.: БХВ – Петербург, 2004. – 1168 с.: ил.
6. Тепляшин В.Н. Технологии и оборудование для сушки растительного сырья [Электронный ресурс]: учеб. пособие / В.Н. Тепляшин, Л.И. Ченцова, В.Н. Невзоров; Краснояр. гос. аграр. ун–т. – Красноярск, 2019 – 173 с.
7. Гинзбург А.С. Расчет и проектирование сушильных установок пищевой промышленности. – М.: Агропромиздат, 1985. – 336 с.
8. Шевцов А.А. Резервы энергоэффективности конвективной сушки дисперсных материалов при переменных режимах [Текст] / А. А. Шевцов, А.В. Дранников, В.В. Ткач, Н.А. Сердюкова / Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. – 2017. – № 2. – С. 91 – 99.
9. Остриков А. Н. Энергосберегающие технологии и оборудование для сушки пищевого сырья [Текст] / А. Н. Остриков, И. Т. Кретов, А. А. Шевцов, В. Е. Добромиров / Воронеж. гос. технол. акад. Воронеж, 1998. – 344 с.
10. Остриков А.Н. Оптимизация процесса сушки зерновых культур в барабанной сушилке с тепловым насосом [Текст] / А.Н. Остриков, А.А. Шевцов, В.В. Ткач, Н.А. Сердюкова / Известия вузов. Пищевая технология. – 2018. – № 1. – С. 74 – 78.
11. Машины и аппараты пищевых производств. В 2 кн. Кн. 2: [Текст]: учеб. для вузов / С. Т. Антипов, И. Т. Кретов, А. И. Остриков и др.; Под ред. акад. РАСХН В.А. Панфилова. – М.: Высш. шк., 2001. – 703 с.
12. Лыков А.В. Теория сушки. – М.: Энергия 1968. – 471 с.
13. Kirstie Plantenberg. A Hands – On Introduction to SolidWorks. SDC Publications, 2023, p. 600.
14. Основные элементы SolidWorks. TRAINING. Dassault Systems SolidWorks Corporation, Dassault Systems S.A; 1995 – 2009, p. 550.
15. Большаков В. П. 3D – моделирование в AutoCAD; Компас – 3D; SolidWorks; Inventor; T – Flex: [Текст] / В.П. Большаков, А.Л. Бочков, А.А. Сергеев / Учебный курс(+DVD). – СПб.: Питер, 2011. – 336 с.: ил.
16. Алямовский А.А. SolidWorks 2007/2008. Компьютерное моделирование в инженерной практике [Текст] / А.А. Алямовский, А.А. Собачкин, Е.В. Одинцов, А.И. Харитонович, Н.Б. Пономарев. – СПб.: БХВ – Петербург. 2008. – 1040 с.: ил. + DVD.
17. Тревис Дж. LabVIEW для всех [Текст] / Джеффри Тревис: Пер. с англ. Клушин Н.А. – М.: ДМК Пресс; ПриборКомплект, 2005. – 544 с.: ил.
18. Виноградова Н.А. Разработка прикладного программного обеспечения в среде LabVIEW: учеб. пособие / Н.А. Виноградова, Я.И. Листратов, Е.В. Свиридов.– М.: Издательство МЭИ, 2009. – 47 с.
19. Блюм П. LabVIEW: стиль программирования [Текст] / Питер Блюм: Пер. с англ. под ред. Михеева П. – М.: ДМК Пресс, 2008. – 400 с.: ил.
20. Васильев А.С. Основы программирования в среде LabVIEW: учеб. пособие / А.С. Васильев, О.Ю. Лошманов. – СПб: Университет ИТМО, 2015 – 82 с.

References:

1. Norenkov I.P. Computer-aided design: textbook. Manual.Moscow, 2000; 188 [In Russ].
2. Nesterenko E. S. Fundamentals of computer-aided design systems [Electronic resource]: electron. Lecture notes / E. S. Nesterenko; Ministry of Education and Science of Russia, Samara State Aerospace University

- named after S. P. Korolev (National Research un – t) Electron. text and graph. dan. (0.31 MB). – Samara, 2013.
3. Kondakov A.I. CAD of technological processes: textbook for students. higher. studies. institutions / A.I. Kondakov. M. : Publishing center "Academy", 2007; 272. [In Russ].
 4. Lee K. CAD basics (CAD, CAM, CAE). St. Petersburg: Peter, 2004; 560 [In Russ].
 5. Zuev S.A. CAD based on AutoCAD – how it is done. St. Petersburg: BHV. Petersburg, 2004; 1168 [In Russ].
 6. Teplyashin V.N. Technologies and equipment for drying vegetable raw materials [Electronic re-source]: textbook. manual / V.N. Teplyashina, L.I. Chentsova, V.N. Nevzorov; Krasnoyar. state agrarian. un – t. Krasnoyarsk, 2019; 173 [In Russ].
 7. Ginzburg A.S. Calculation and design of drying plants of the food industry. M.: Agropromiz-dat, 1985; 336 [In Russ].
 8. Shevtsov A.A. Reserves of energy efficiency of convective drying of dispersed materials in variable modes [Text] / A. A. Shevtsov, A.V. Drannikov, V.V. Tkach, N.A. Serdyukova. *Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2017; 2: 91-99 [In Russ].
 9. Ostrikov A. N. Energy-saving technologies and equipment for drying food raw materials [Text] / A. N. Ostrikov, I. T. Kretov, A. A. Shevtsov, V. E. Dobromirov. *Voro-nezh. gos. technol. acad. Voronezh*, 1998; 344 p.
 10. Ostrikov A.N. Optimization of the drying process of grain crops in a drum dryer with a heat pump [Text]. A.N. Ostrikov, A.A. Shevtsov, V.V. Tkach, N.A. Serdyukova. *Izvestiya vuzov. Food technology*. 2018;1.: 74-78 [In Russ].
 11. Machines and devices of food production. In 2 book. Book 1: [Text]: tb. for University / S. T. Antipov, II. T. Kretov, A. I. Ostrikov ; Edited by. RASCHN V.A. Panfilov. M.: *High school.*, 2001; 703 [In Russ].
 12. Lykov A.V. Theory of drying. M.: *Energiya* 1968; 471 [In Russ].
 13. Kirstie Plantenberg. A Hands – On Introduction to SolidWorks. SDC Publications, 2023; 600 .
 14. Basic elements SolidWorks. TRAINING. Dassault Systems SolidWorks Corporation, Dassault Systems S.A; 1995 – 2009; 550.
 15. Bolshakov V. P. 3D modeling in AutoCAD; Compass – 3D; SolidWorks; Inventor; T – Flex: [Text] / V.P. Bolshakov, A.L. Bochkov, A.A. Sergeev. *Training course(+ DVD)*. – St. Petersburg: Peter, 2011; 336 [In Russ].
 16. Alyamovsky A.A. SolidWorks 2007/2008. Computer modeling in engineering practice [text] / a.A. Alyamovsky, A.A. Sobachkin, E.V. Odintsov, A.And. Haritonovich, N.B. Ponomarev. - SPB.: BHV-Petersburg, 2008; 1040 + DVD.
 17. Travis J. Labview for everyone [Text] / Jeffrey Travis: Translated from English by Klushin N.A. – M.: DMK Press; Instrument Kit, 2005; 544.
 18. Vinogradova N.A. Development of applied software in the LabVIEW environment: textbook. the manual / N.A. Vinogradova, Ya.I. Listratov, E.V. Sviridov. M.: Publishing House of MEI, 2009;47. [In Russ].
 19. Blum P. LabVIEW: programming style [Text] / Peter Blum: Translated from English. ed. Mikheeva P. – M.: DMK Press, 2008; 400.
 20. Vasiliev A.S. Fundamentals of programming in the LabVIEW environment: textbook. manual / A.S. Vasiliev, O.Y. Loshmanov. St. Petersburg: ITMO University, 2015; 82 [In Russ].

Сведения об авторах:

Ткач Владимир Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры общепрофессиональных дисциплин; tkachbalian@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

Alexander A. Shevtsov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Prof, Department of general professional disciplines; tkachbalian@yandex.ru

Конфликт интересов / Conflict of interest.

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

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/ Received 31.01.2023.

Одобрена после рецензирования / Reviced 22.02.2023.

Принята в печать /Accepted for publication 22.02.2023.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 69.058

DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-1-161-166

Оригинальная статья /Original Paper

Расчет несущей способности изгибаемых плит с учетом диаграмм деформирования бетона

А.Я. Джанкулаев, О.М. Шогенов, З.Р. Лихов, А.М. Казиев, И.А. Блянихов

Кабардино-Балкарский государственный университет,
360004, г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173, Россия

Резюме. Цель. Исследуется влияние характера ниспадающей ветви диаграмм сжатия и растяжения бетона на предельную несущую способность изгибаемых сечений железобетонных конструкций при различных условиях нагружения близких к разрушению по нелинейной модели методом конечных элементов. **Метод.** Применен метод конечных элементов в физически нелинейной постановке с использованием деформационной теории Н.И.Карпенко. Диаграммы деформирования используются с различной крутизной ниспадающей ветви. Расчеты выполняются шаговым итерационным методом последовательных нагружений по слоистой модели. **Результат.** Произведен численный расчет плитных железобетонных элементов при различных условиях физической нелинейности бетона. **Вывод.** Обнаружено незначительное влияние крутизны ниспадающей ветви на несущую способность плитных изгибаемых конструкций. Использование упрощенных диаграммных зависимостей оправдано для проведения численных расчетов по нелинейной модели.

Ключевые слова: диаграмма деформирования бетона, метод конечных элементов, слоистая модель

Для цитирования: А.Я. Джанкулаев, О.М. Шогенов, З.Р. Лихов, А.М.Казиев, И.А.Блянихов. Расчет несущей способности изгибаемых плит с учетом диаграмм деформирования бетона. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023; 50(1):161-166. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-1-161-166

Calculation of the load-bearing capacity of the bent plates taking into account the diagrams of concrete deformation

A.Y. Dzhankulaev, O.M. Shogenov, Z.R. Likhov, A.M. Kaziev, I.A. Blyanikhov

H.M. Berbekov Kabardino-Balkarian State University,
173 Chernyshevsky St., Nalchik 360004, Russia

Abstract. Objective. The influence of the nature of the descending branch of concrete compression and stretching diagrams on the ultimate load-bearing capacity of bent cross-section reinforced concrete structures under various loading conditions close to destruction according to the nonlinear finite element model is investigated. **Method.** The solution is performed by the finite element method in a physically nonlinear formulation using N.I.Karpenko's deformation theory. Deformation diagrams are used with different steepness of the descending branch. Calculations are performed by a step-by-step iterative method of successive loads on a layered model. **Result.** The results of numerical calculation of slab reinforced concrete elements under various conditions of physical nonlinearity of concrete are presented. **Conclusion.** The insignificant influence of the steepness of the descending branch on the load-bearing capacity of plate bendable structures has been found and the use of simplified diagram dependencies is fully justified for numerical calculations using a nonlinear model.

Keywords: concrete deformation diagram, finite element method, layered model

For citation: A.Y. Dzhankulaev, O.M. Shogenov, Z.R. Likhov, A.M.Kaziev, I.A.Blyanikhov. Calculation of the load-bearing capacity of the bent plates taking into account the

diagrams of concrete deformation. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science. 2023; 50(1):161-166. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-1-161-166

Введение. В последние годы наиболее популярным стал деформационный метод для расчета железобетонных конструкций с использованием полных диаграмм деформирования бетона и арматуры, что обеспечивает высокую точность расчета прочностных и деформативных параметров различных конструкций. Расчет железобетонных элементов на прочность по нелинейной деформационной модели производят на основе диаграмм осевого сжатия бетона, растяжения арматуры и гипотез плоских сечений или прямых нормалей. Связь между деформациями и напряжениями в диаграммах деформирования осуществляется по результатам испытаний стандартных образцов (призм, цилиндров) для бетона под нагрузкой сжатия, а арматуры при растяжении. Нормативные документы рекомендуют в качестве расчетных, аппроксимирующих экспериментальные кривые деформирования бетона, стальной арматуры и устанавливающих связь между относительными деформациями и напряжениями, разные виды диаграмм: упрощенные, криволинейные, рабочие кусочно-линейные, соответствующие механическим свойствам материалов.

Процесс расчета сводится к выделению по высоте сечения элементарных участков и, используя аналитические связи между напряжениями и деформациями в диаграммах деформирования материалов, для каждого участка формируются значения средних напряжений. Переход от напряжений к внутренним обобщенным усилиям выполняется с помощью количественного суммирования усилий от напряжений по толщине сечения элемента и после проверки условия равновесия в физических соотношениях вычисляются внутренние усилия, величина которых не должна превосходить усилий от внешних воздействий.

Постановка задачи. Для расчета практических деформаций бетона и арматуры от внешней нагрузки, решается нелинейная задача методом последовательных приближений (итераций) или в приращениях до выполнения условия равновесия усилий в сечении с заданной точностью по контролируемому параметру. Если максимальные относительные деформации от внешней нагрузки не превышают нормируемых значений предельных относительных деформации бетона на сжатие и арматуры на растяжение, то прочность сечения обеспечивается. При деформациях выше предельных значений соответствующий элемент бетона или стержень арматуры уменьшает свой вклад в работу по нисходящей ветви и, условие прочности удовлетворяется при перераспределении напряжений. Когда при заданных параметрах сечения необходимо определить значения предельных усилий, в практике проектирования выполняются проверочные расчеты. Материалы бетон и арматура имеют различные деформационные и прочностные характеристики.

По этой причине к предельным деформациям арматура и бетон приходят не одновременно, и определение материала ответственного за разрушение сечения в целом происходит в процессе итерационного расчета. Соотношения между параметрами в предельном состоянии устанавливаются из условия равенства равнодействующих усилий в бетоне сжатой зоны с фактической и рекомендуемой нормами эпюрами напряжений в зависимости от вида используемых в расчетах диаграмм бетона.

Методы исследования. Диаграммы деформирования бетона являются исходной базой для построения нелинейных моделей расчета железобетонных конструкций. Начальными являются диаграммы деформирования бетона при кратковременном нагружении. Их аналитические зависимости трансформируются на предмет учета различных факторов, влияющих на работу бетона: не одноосное напряженно-деформированное состояние, деформаций ползучести, повышенная температура, усадка, трещины, ползучесть и т.д. Известные аналитические выражения диаграмм σ - ϵ для бетона на восходящей ветви практически совпадают. Однако на нисходящей части диаграмм нет такого совпадения мнений у исследователей. Предлагаются различные варианты этой части диаграммы от ее обрыва до бесконечности с различной крутизной. В данной работе выбран второй тип диаграммы и анализируется влияние характера ниспадающей ветви диаграммы σ - ϵ бетона

на несущую способность железобетонных изгибаемых элементов. Расчет ведется методом конечных элементов. Нелинейность учитывается шаговым итерационным способом согласно слоистой модели расчета. Аналитические выражения для диаграмм записываются применительно к расчету конструкций по предельным состояниям второй группы. Если расчет ведется по предельным состояниям первой группы, то во всех формулах характеристики бетона R_{bser} , R_{btser} , ε_{bser} , ε_{btser} заменяются на R_b , R_{bt} , ε_b , ε_{bt} . Согласно рекомендациям НИИЖБ в расчетах конструкций на кратковременное действие возрастающей нагрузки в качестве исходной диаграммы одноосного сжатия или растяжения бетона, если нет специальных указаний или ограничений на время действия нагрузки и режим ее приложения, следует принимать диаграмму, получаемую при одноосном нагружении стандартных образцов - призм с постоянными скоростями роста деформаций для отрезка времени до вершины диаграммы [1-13]. Физико-механические свойства стальной арматуры и вид ее диаграммы определялись согласно [1]. Из физических соображений представляется очевидным, что чем больше предельная деформация бетона при разрыве (или предельная растяжимость бетона ε_{bt}), тем большим должно быть сопротивление конструкции образованию трещин и дальнейшему разрушению. В работе [13] предлагается зависимость для коэффициента изменения секущего модуля упругости бетона, которая базируется на минимальном числе физико-механических характеристик бетона. Она охватывает области сжатия и растяжения бетона и удобна при создании различных нелинейных расчетных моделей железобетонных конструкции [14-20]. В общем случае все предлагаемые исследователями виды диаграмм удовлетворяют следующим трем условиям:

$$\begin{aligned} \text{При } \varepsilon = 0 \quad E_{сек} &= E_b; \\ \text{При } \varepsilon = \varepsilon_R \quad \sigma &= R; \\ \text{При } \varepsilon = \varepsilon_R \quad \sigma' &= 0. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь E – начальный модуль упругости бетона; R – прочность бетона на сжатие R_b при $\varepsilon < 0$, прочность бетона на растяжение R_{bt} при $\varepsilon > 0$; ε_R – относительная деформация сжатия ε_b в вершине диаграммы при $\varepsilon < 0$, относительная деформация растяжения ε_{bt} в вершине диаграммы при $\varepsilon > 0$; ε – текущая относительная деформация бетона.

Уравнение диаграммы σ - ε , выбранное для расчетных экспериментов и анализа их результатов предполагается в виде функции и имеет формулу, предложенную в работах [2,5]:

$$\sigma = \frac{\varepsilon}{a + b\varepsilon + c\varepsilon^t} \quad (2)$$

Функция (2) выражена только через переменную текущую относительную деформацию ε . Восходящая и нисходящая ветви диаграммы бетона, как при сжатии, так и при растяжении описываются одним уравнением. Это удобно при организации нелинейных вычислительных расчетов разными численными методами. Неизвестные параметры **a, b, c** удобно находить из условий (1) средствами символьного программирования Matlab. Характер диаграммы σ - ε регулируется параметром t . Причем t принимает по математическим соображениям только четные значения. Чем больше его значение, тем круче ниспадающая ветвь. Здесь мы ограничились двумя уровнями крутизны ниспадающей ветви.

Для $t=2$ получаем: $a=1/E_b$, $b=(E_b\varepsilon_R-2R)/(RE_b\varepsilon_R)$, $c=1/(E_b\varepsilon_R^2)$.

Диаграмма (рис. 1,а) имеет пологую нисходящую ветвь и достаточно хорошо согласовывается с предложениями Н.И.Карпенко и Д.Р.Маиляна [1,4]. При $t=4$ получаем диаграмму с более крутой нисходящей ветвью (рис. 1,б). Параметры **a, b, c** уравнения (2) принимаются равными: $a=1/E_b$, $b=(3E_b\varepsilon_R-4R)/(3RE_b\varepsilon_R)$, $c=1/(3E_b\varepsilon_R^4)$.

Надо отметить, что до уровня деформации ε_R в вершине диаграммы практически одинаковы, разница составляет всего 2%. За пределами вершины диаграммы эта разница начинает увеличиваться и составляет: 2,5% при $\varepsilon=1,5\varepsilon_R$ и 8% при $\varepsilon=2\varepsilon_R$.

Эти две диаграммы использовались для дальнейших численных экспериментов.

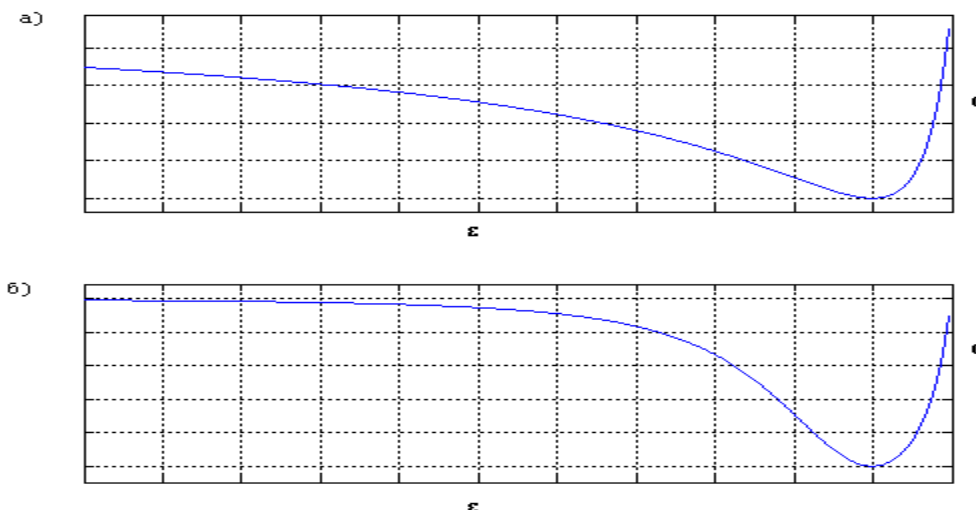


Рис. 1. Диаграммы зависимости σ - ϵ

Fig. 1. Dependency diagrams σ - ϵ

Обсуждение результатов. Численные расчеты проводились на железобетонных сплошных плитных элементах разной толщины при различных условиях по краям и характеристиках бетона. Деформационные характеристики вычислялись по слоистой модели. Расчетные эксперименты проводились конечными элементами, предложенными в работе [10] и показали, что в момент разрушения наибольшие деформации в бетоне не превышают обычно $1.5\epsilon_R$. Влияние крутизны ниспадающей ветви, предложенных выше диаграмм σ - ϵ бетона, на несущую способность железобетонных сечений было незначительно и составляло от 1% для сечений толстых плит до 1.7% для более тонких плит. Однако надо отметить, что здесь использовались одномерные диаграммы без их трансформации [15] на предмет учета двумерной или трехмерной работы бетона в различных точках конструкции. А в алгоритмах такой трансформации важно иметь единую математическую зависимость на всем диапазоне деформирования материала.

Вывод. Таким образом, железобетонное сечение разрушается в проведенных численных экспериментах по данной модели раньше, чем начинает проявляться различие крутизны нисходящей ветви диаграммы бетона. В таком случае использование упрощенных диаграммных зависимостей вполне оправдано для проведения численных расчетов по нелинейной модели.

Библиографический список:

1. Карпенко Н.И., Мухамедиев Т.А., Петров А.Н. Исходные и трансформированные диаграммы деформирования бетона и арматуры // Напряженно-деформированное состояние бетонных и железобетонных конструкций. - М.: НИИЖБ Госстроя СССР, 1986. - с. 7-25.
2. Карпенко Н.И. К совершенствованию диаграмм деформирования бетона для определения момента трещинообразования и разрушающего момента в изгибаемых железобетонных элементах / Н.И. Карпенко, О.В. Радайкин / Строительство и реконструкция. – 2010 - №3 (41) – с. 10-16.
3. Карпенко Н.И. К определению деформаций изгибаемых железобетонных элементов с использованием диаграмм деформирования бетона и арматуры / Н.И. Карпенко, Б.С. Соколов, О.В. Радайкин / Теория инженерных сооружений. Строительные конструкции. – 2012 - №2 (40) – с. 11-1911
4. Карпенко Н.И. К построению методики расчета стержневых элементов на основе диаграмм деформирования материалов. Н.И. Карпенко, Т.А. Мухамедиев, М.А. Сапожников // Совершенствование методов расчета статически неопределимых железобетонных конструкций. – М.: 1987. – С. 4-24.13
5. Карпенко Н.И. К построению обобщенной зависимости для диаграммы деформирования бетона [Текст] / Н.И. Карпенко // Строительные конструкции. – Минск, 1983. – С. 164-173.12
6. Карпенко Н.И. К расчету прочности, жесткости и трещиностойкости внецентренно сжатых железобетонных элементов с применением нелинейной деформационной модели / Н.И. Карпенко, Б.С. Соколов, О.В. Радайкин / Известия КГАСУ. – 2013 - № 4 (26) – с. 113-120.25

7. Карпенко Н.И. К совершенствованию диаграмм деформирования бетона для определения момента трещинообразования и разрушающего момента в изгибаемых железобетонных элементах / Н.И. Карпенко, О.В. Радайкин / Строительство и реконструкция. – 2010 - №3 (41) – с. 10-16.15
8. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона. – М.: Стройиздат, 1996. – 416 с.9
9. Карпенко С.Н. О построении связей между приращениями напряжений и деформаций на основе различных диаграмм Вестник гражданских инженеров. – СПбГАСУ. – 2010. – №1.14
10. Dzhankulayev, A.Y., Likhov, Z.R., Shogenov, O.M. The Finite Element of the Plate with the Account of the Transformation of the Cross Section and the Nonlinear Foundation. Conference: 2018 IEEE International Conference "Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies" (IT&QM&IS). 2018. Vol. 8525048.
11. Джанкулаев А.Я., Карпенко Н.И. Методика учета объемного напряженно-деформированного состояния в расчетах железобетонных плит. Материалы 29-ой международной конференции в области бетона и железобетона. – М.: Стройиздат. – 1992.
12. Джанкулаев А.Я. Диаграмма деформирования бетона // Вестник КБГУ. Серия Технические науки. Выпуск 5.-Нальчик: Каб.-Балк. ун-т., 2003.-с.101-103.
13. Джанкулаев А.Я. Моделирование диаграммы деформирования бетона в системе MATLAB. Гутов А.А., Карданов М.М., Машуков И.К., Кабло М. Университетский научный сборник №3. Нальчик: КБГУ, 2019
14. Finite element calculation model of the piled rafts. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 913(3),032054. Dzhankulayev, A.J., Guenko, N.A., Dzhankulayev, A.A., Dyshekov, H.M.
15. Д.Р. Маилян., К.В. Кургин. О необходимости трансформации базовой аналитической зависимости " σ_b - ϵ_b " бетона // Инженерный вестник Дона, №4 (2011) ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2011/712.
16. Ерышев В.А. Численные методы расчета прочности железобетонных элементов по нелинейной деформационной модели с использованием диаграмм деформирования материалов / В.А. Ерышев / Вестник НГИЭИ. – 2018 - № 6 (85) – с. 17-26.31
17. З.Р. Лихов, В.Х. Хуранов, М.И. Бжахов, А.Я. Джанкулаев. Учет полных диаграмм деформирования материалов в алгоритме расчета изгибаемых железобетонных элементов. Научно-технический вестник Поволжья. №6 2014г. – Казань. с.213-218.
18. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. — М.: Мир, 1975. 542 с.
19. Бате К., Р. Вилсон. Численные методы анализа и метод конечных элементов – М.: Стройиздат, 1982. – 448 с.
20. Никулина Ю.А., С.И. Пирко, В.В. Кочерженко. Особенности применения нелинейной и упрощенной деформационных расчетных моделей для определения прочности изгибаемых железобетонных элементов прямоугольного сечения. Наука и инновации в строительстве. – 2017 – с. 82-89

References:

1. Karpenko N.I., Mukhamediev T.A., Petrov A.N. Initial and transformed diagrams of concrete and reinforcement deformation. *The stress-strain state of concrete and reinforced concrete structures*. -M.:NIIZHB Gosstroy of the USSR, 1986;7-25. [In Russ]
2. Karpenko N.I. To improve the diagrams of concrete deformation to determine the moment of cracking and the breaking moment in bent reinforced concrete elements / N.I. Karpenko, O.V. Radaykin. *Construction and reconstruction*. 2010; 3 (41):10-16. [In Russ]
3. Karpenko N.I. To the definition of deformations of bent reinforced concrete elements using diagrams of concrete and reinforcement deformation. N.I. Karpenko, B.S. Sokolov, O.V. Radaykin. *Theory of engineering structures. Building structures*. 2012; 2 (40): 11-1911[In Russ]
4. Karpenko N.I. To the construction of methods for calculating core elements based on diagrams of deformation of materials [Text]N.I. Karpenko, T.A. Mukhamediev, M.A. Sapozhnikov. *Improvement of methods for calculating statically indeterminate reinforced concrete structures*. M.: 1987; 4-24.13[In Russ]
5. Karpenko N.I. On the construction of a generalized dependence for the concrete deformation diagram [Text] / N.I. Karpenko. *Building structures*. Minsk, 1983; 164-173.12[In Russ]
6. Karpenko N.I. To the calculation of strength, stiffness and crack resistance of non-centrally compressed reinforced concrete elements using a nonlinear deformation mode.N.I. Karpenko, B.S. Sokolov, O.V. Radaykin *Izvestiya KGASU*. 2013;4 (26): 113-120.25[In Russ]
7. Karpenko N.I. To the improvement of concrete deformation diagrams for determining the moment of cracking and breaking moment in bent reinforced concrete elements. N.I. Karpenko, O.V. Radaykin. *Construction and reconstruction*. 2010; 3 (41):10-16.15[In Russ]
8. Karpenko N.I. General models of reinforced concrete mechanics. M.: *Stroyizdat*, 1996;416[In Russ]
9. Karpenko S.N. On the construction of connections between stress and strain increments based on various diagrams [Text] *Bulletin of Civil Engineers*. SPbGASU. 2010;1.14[In Russ]
10. Dzhankulayev, A.Y., Likhov, Z.R., Shogenov, O.M. The Finite Element of the Plate with the Account of the Transformation of the Cross Section and the Nonlinear Foundation. Conference: 2018 IEEE Interna-

- tional Conference "Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies" (IT&QM&IS). 2018; 8525048.
11. Dzhankulaev A.Y., Karpenko N.I. Methods of accounting for the volumetric stress-strain state in the calculations of reinforced concrete slabs. Materials of the 29th International Conference in the field of concrete and reinforced concrete. Moscow: Stroyizdat. 1992. [In Russ]
 12. Dzhankulaev A.Y. Diagram of concrete deformation. *Bulletin of the KBSU. Series of Technical Sciences. Issue 5.*-Nalchik: Kab.-Balk. un-T., 2003;101-103. [In Russ]
 13. Dzhankulaev A.Y. Modeling of the concrete deformation diagram in the MATLAB system. Gutov A.A., Kardanov M.M., Mashukov I.K., Kablo M. *University Scientific Collection Nalchik*: KBSU, 2019;3 [In Russ]
 14. Finite element calculation model of the piled rafts. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 913(3), 032054. Dzhankulayev, A.J., Guenko, N.A., Dzhankulayev, A.A., Dyshekov, H.M.
 15. D.R. Mailyan., K.V. Kurgin. On the need to transform the basic analytical dependence "ob-eb" of concrete. *Engineering Bulletin of the Don*, 2011; 4.ivdon.ru/ru/magazine/archive / n4y2011/712. [In Russ]
 16. Yeryshev V.A. Numerical methods for calculating the strength of reinforced concrete elements using a nonlinear deformation model using material deformation diagrams. *Bulletin of the NGIEI*. 2018;6 (85):17-26.31 [In Russ]
 17. Z.R. Likhov, V.H. Khuranov, M.I. Bzhakhov, A.Ya. Dzhankulaev. Accounting of complete diagrams of deformation of materials in the calculation algorithm of bent reinforced concrete elements. *Scientific and Technical Bulletin of the Volga region*. Kazan. 2014;62:13-218. [In Russ]
 18. Zenkevich O. Finite element method in engineering. M.: Mir, 1975; 542. [In Russ]
 19. Bate K., R. Wilson. Numerical methods of analysis and the finite element method. M.: Stroyizdat, 1982; 448. [In Russ]
 20. Nikulina Yu.A., S.I. Pirko, V.V. Kocherzhenko. Features of the application of nonlinear and simplified deformation calculation models for determining the strength of bent reinforced concrete elements of rectangular cross-section. *Science and Innovation in Construction*. 2017; 82-89 [In Russ]

Сведения об авторах:

Джанкулаев Амерхан Яхьяевич, кандидат технических наук, доцент кафедры строительных конструкций и механики; dzhankulaevaj@yandex.ru

Шогенов Олег Мухамедович, кандидат технических наук, доцент кафедры строительных конструкций и механики; admn5@mail.ru

Лихов Залимхан Русланович, кандидат технических наук, доцент кафедры строительных конструкций и механики; zalimhan@mail.ru

Казиев Аслан Мугазович, кандидат технических наук, доцент кафедры строительных конструкций и механики; kaziev1969@mail.ru

Блянихов Ислам Адамович, магистрант кафедры строительных конструкций и механики; iblyanickhov@gmail.com

Information about the authors:

Amerhan Y. Dzhankulaev, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Department of Building Structures and Mechanics; dzhankulaevaj@yandex.ru

Oleg M. Shogenov, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Department of Building Structures and Mechanics; admn5@mail.ru

Zalimhan R. Likhov, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Department of Building Structures and Mechanics; zalimhan@mail.ru

Aslan M. Kaziyeu, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Department of Building Structures and Mechanics; kaziev1969@mail.ru

Islam A. Blyanikhov, Master's student, Department of Building Structures and Mechanics; iblyanickhov@gmail.com

Конфликт интересов / Conflict of interest.

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

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/ Received 11. 12.2022.

Одобрена после рецензирования / Reviced 10.01.2023.

Принята в печать /Accepted for publication 10.01.2023.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 624

DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-1-167-173

Оригинальная статья /Original Paper

О моделях колебаний грунтов при сильных землетрясениях

Х.Р. Зайнулабидова, У.Д. Тотурбиева, А.М. Джамалудинов

Дагестанский государственный технический университет,
367026, г. Махачкала, пр. И. Шамиля, 70, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является определение на основе разработанных моделей описывающих сейсмические воздействия, наиболее приемлемых для принятия с точки зрения точности описания сейсмического колебания как по форме огибающей, так и по продолжительности, и по частотным характеристикам. **Метод.** Использование эмпирических моделей при описании колебаний грунтов как случайного процесса рассматривалось в ряде работ. В данной работе исследуется обоснованность эмпирических моделей и некоторые трудности, возникающие при моделировании процесса колебаний. **Результат.** Предложена методика оценки надёжности предлагаемых моделей воздействий, которая учитывает грунтово - геологические характеристики, а также спектральные данные инструментальных записей известных землетрясений. **Вывод.** Модель сейсмического воздействия, а также аппроксимирующая моделирующая функция должна определяться степенью ответственности здания; модель для расчета зданий массовой застройки должна обеспечить сейсмостойкость при строительстве на любой территории, даже без учёта региональных составляющих, а модель для расчета уникальных объектов должна учитывать сейсмологические данные конкретной строительной площадки.

Ключевые слова: землетрясения, модель воздействия, аппроксимация, огибающая, частота, длительность землетрясений, сейсмические свойства

Для цитирования: Х.Р. Зайнулабидова, У.Д. Тотурбиева, А.М. Джамалудинов. О моделях колебаний грунтов при сильных землетрясениях. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023; 50(1):167-173. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-1-167-173

On models of ground vibrations in strong earthquakes
H.R. Zainulabidova, U.D. Toturbieva, A.M. Jamaludinov

Daghestan State Technical University,
70 I. Shamil Ave., Makhachkala, 367026, Russia

Abstract. Objective. The purpose of these studies is to determine, on the basis of the developed models describing seismic impacts, the most acceptable for acceptance from the point of view of the accuracy of the description of the seismic oscillation both in the shape of the envelope and in duration and frequency characteristics. **Method.** The use of empirical models in describing soil fluctuations as a random process has been considered in a number of papers. This paper presents the main simplifying assumptions used in this approach. The validity of empirical models and some difficulties encountered in modeling the oscillation process are investigated. **Result.** A methodology for assessing the reliability of the proposed impact models is proposed. The proposed method takes into account the soil - geological characteristics, as well as spectral data of instrumental recordings of known earthquakes. **Conclusion.** The seismic impact model, as well as the approximating modeling function, should be determined by the degree of responsibility of the building.

Keywords: earthquakes, impact model, approximation, envelope, frequency, duration of earthquakes, seismic properties

For citation: H.R. Zainulabidova, U.D. Toturbieva, A.M. Jamaludinov. On models of ground vibrations in strong earthquakes. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science. 2023; 50(1):167-173. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-1-167-173

Введение. Одна из задач теории сейсмостойкости состоит в определении реакции зданий и сооружений на сейсмическое воздействие, заданное в виде акселерограмм, сейсмограмм или велосиграмм. Расчётная модель системы определяется видом здания или сооружения, модель должна быть такая, что позволит определить отклик системы на сейсмическое воздействие. Колебания грунта при сейсмических воздействиях являются случайными процессами, зависящие от параметров источника, механизма действия, строения среды, местных грунтово-геологических условий. Многие из этих параметров трудно определить.

Исследователь, приступающий к расчёту конструкций зданий или сооружений оказывается в трудном положении, так как воздействие на систему должно быть задано в форме случайного процесса, близкого к реальному сейсмическому воздействию, но современное состояние науки не позволяет дать точный прогноз сейсмических воздействий, как в области низкочастотных (менее 1 Гц), так и в области высокочастотных (1-20 Гц) колебаний. Поэтому реалии состояния современной науки позволяют нам задать только сейсмическую нагрузку в вероятностной форме.

Постановка задачи. Модель воздействия - это гипотеза о характере случайного процесса, которая в дальнейшем может быть подтверждена или опровергнута на базе анализа экспериментальных данных.

Основные упрощающие предположения, используемые при построении эмпирических моделей [1-7], заключаются в следующем:

1. Колебания грунта $\ddot{Y}(t)$ описываются гауссовским процессом, при котором каждая реализация процесса формируется произведением изменяющейся во времени по сравнению с основным периодом колебаний детерминистической функцией $A(t)$ на реализацию гауссовского стационарного процесса $\eta_k(t)$ с единичной дисперсией,
2. Предполагается, что существуют универсальные параметрические выражения, аппроксимирующие моделирующую функцию и энергетический спектр $S(\omega)$ гауссовского процесса, независимые от сейсмологических условий.
3. Исследователи [1, 8-12, 20] предлагают свои видения этого процесса.

В частности, зависимости, предложенные в работе [10] имеют следующий вид:

$$A(t) = b \cdot t \cdot \exp(-c \cdot t) \quad (2)$$

$$s(\omega) = \frac{4 \cdot d(\omega + \omega_{df}^2)}{(\omega^2 + \omega_{df}^2)^2 - 4 \cdot f^2 \cdot \omega^2} \quad (3)$$

$$\omega_{df}^2 = d^2 + f^2 \quad (4)$$

В зависимости от сейсмологических условий, параметры модели могут принимать разные значения. Согласно работе [10], перечисленные упрощающие предположения корректны для описания колебаний скальных грунтов на средних гипоцентральных расстояниях. В случае, когда все три компонента движения были заданы, вводится дополнительное предположение о независимости различных компонент движения.

Каждая компонента представляет собой случайный процесс, описываемый выражением (1). Более сложные модели случайного процесса приведены в работах [2- 4, 15-20]. Приняв решение и выбрав модель случайного процесса, необходимо исследовать зависимость значений параметров b - f от параметров очага и среды. Как правило, это магнитуда землетрясения, гипоцентральное расстояние, тип грунта у поверхности.

Методы исследования. Рассмотрим одну из методик проведения исследований: рассмотрим множество акселерограмм сильных землетрясений и допустим, что каждая из акселерограмм является реализацией случайного процесса $\ddot{Y}(t)$, описываемого выражением

ями (1) – (4), тогда произведём оценку параметров процесса по одной реализации. Изучая соответствие параметров процесса b-f и параметров очага среды, получим искомую зависимость. Установление указанной зависимости позволит определить область вероятных значений параметров процесса b-f, имеющих место при конкретных сейсмологических условиях. Большой интерес представляет также вопрос о взаимной зависимости параметров b-f.

Ясно, что оценка параметров модели по одной реализации процесса не может быть произведена, даже если модель идеально правильная. Качество оценки должно быть контролируемо в каждом конкретном случае.

В данной работе приводится критерий оценки качества простейшего метода определения параметров модели, описываемой формулами 1-4

Оценка параметров модели по одной реализации процесса

Функцию $A_0(t)$, определяем по формуле (5)

$$A_0(t) = \sqrt{\frac{1}{T}} \cdot \int_{t-T/2}^{t+T/2} [\ddot{Y}_0(t)]^2 dt \quad (5)$$

где, $\ddot{Y}_0(t)$ – анализируемая акселерограмма, которая служит оценкой моделирующей функции $A(t)$ в том случае, когда время усреднения T велико по сравнению с основным периодом колебаний процесса и мало по сравнению с общей длительностью записи T_m , тогда в соответствии (1) получаем следующее выражение:

$$\ddot{Y}_0(t) = A(t) \cdot \eta_0(t) \quad (6)$$

Используя выражение (5) и учитывая медленный характер изменения $A(t)$, получим:

$$A(t) - A_0(t) = A(t) \cdot \left[\frac{1}{T} \cdot \int_{t-T/2}^{t+T/2} (\eta(t))^2 dt \right] \quad (7)$$

Исходя из выражения (7), можно предположить, что функция

$$\Delta A_0(t) = A(t) - A_0(t) \quad (8)$$

Должна испытывать некоторое отклонение относительно среднего значения, которое равно нулю. Если вычислить $A_0(t_i)$ в ряде точек t_i по формуле (5) и аппроксимировать полученные данные выражением (2), то указанные отклонения скажутся на точности оценки параметров b и c. Но низкие требования к точности оценок моделирующей функции позволяет пренебречь этим эффектом [4]. Аппроксимация производится при помощи метода наименьших квадратов.

Далее поделив $\ddot{Y}_0(t)$ на $A(t)$, можно приступить к оценке параметров стационарной функции $R(t, \tau) = M[\eta(t) \cdot \eta(t+\tau)]$ стационарного случайного процесса не зависит от t и связана с энергетическим спектром $S(\omega)$ процесса соотношением (9)

$$S(\omega) = 4 \cdot \int_0^\infty R(\tau) \cdot \cos(\omega \cdot \tau) d\tau \quad (9)$$

$$R(\tau) = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \int_0^\infty S(\omega) \cdot \cos(\omega \cdot \tau) d\omega \quad (10)$$

Корреляционная функция процесса η , энергетический спектр которого задан в форме (3), имеет вид (11)

$$R(\tau) = \exp(-d|\tau|) \cos(f\tau) \quad (11)$$

Так как выражение (11) достаточно простое анализ корреляционной функции может быть использован [4] для вычислений значений d, f , определяющих случайный процесс η . Если длительность реализации велика, т.е. $(T_m \rightarrow \infty)$, то функция $R(\tau)$ приблизительно совпадает с временной корреляционной функцией $R_{Tm}(\tau)$, которая вычисляется с использованием одной реализации $\eta(t)$:

$$R_{Tm}(\tau) = \frac{1}{T_m - \tau} \cdot \int_0^{T_m - \tau} \eta_0(t) \cdot \eta_0(t + \tau) dt \quad (12)$$

Как показано в (11) математическое ожидание $M[\Delta R(\tau)]$ разности корреляционной функции $R(\tau)$ и временной корреляционной функции $R_{Tm}(\tau)$ равны нулю

$$\Delta R(\tau) = R(\tau) - R_{Tm}(\tau) \quad (13)$$

Дисперсию можно определить по следующей формуле:

$$\sigma_i^2 = M_i\{(\Delta R(\tau))^2\} \leq \frac{4}{T_m} \cdot \int_0^{T_m} R^2(\vartheta) d\vartheta \quad (14)$$

В случае длительной реализации ($T_m \rightarrow \infty$) дисперсия σ_i стремится к нулю. В таком случае вычисление $R_{Tm}(\tau)$ в ограниченном числе точек и последующая аппроксимация e_t по вычисленным значениям выражением (11) позволяет оценить параметры d и f процесса. По вычисленным значениям $R_{Tm}(\tau)$ определяется средний период τ_0 прохождения через нули функции $R_{Tm}(\tau)$. Значения f в выражении (11) определяется по формуле (15)

$$f = \frac{1}{T_0} \quad (15)$$

Авторы работы [4] предлагают выражение τ_0 через τ_1 первого обращения в ноль функции $R_{Tm}(\tau)$

Приближённая оценка d производится по формуле (16)

$$d^* = \frac{2 \ln \left[R\left(\frac{\tau_0}{2}\right) \right]}{\tau_0} \quad (16)$$

Уточним эту оценку таким образом, чтобы добиться (при фиксированном f) наилучшего согласия аппроксимирующего выражения с вычисленными значениями в пределах одного периода колебаний функции $R_{Tm}(\tau)$:

$$\vartheta(d) = \sum_{i=1}^n (R_i - \exp(-d\tau_i) \cdot \cos f\tau_i)^2 = \min \quad (17)$$

$$R_i = R_{Tm}(\tau_i) \quad (18)$$

Задача сводится к нахождению корня уравнения (19)

$$F(d) = 0 \quad (19)$$

$$\text{где, } F(d) = \sum_{i=1}^n (R_i - \exp(-d\tau_i) \cdot \cos f \cdot \tau_i) \cdot \tau_i \cdot \exp(-d\tau_i) \cdot \cos f \cdot \tau_i \quad (20)$$

С одним неизвестным, которое можно осуществить методом Ньютона

$$d_{n+1} = d_n - \frac{F(d_n)}{\vartheta \cdot (d_n)} \quad (21)$$

Обсуждение результатов. Прежде чем использовать описанный метод следует оценить его качество, исходя из следующих соображений.

Будем считать, что корреляционная функция находится в интервале $\Delta = 2 \cdot \sigma_1$ от своей временной оценки $R(\tau) = R_{Tm}(\tau) + \Delta$

Оценку абсолютной ошибки, можно получить, подставляя в правую часть неравенства (14) временную корреляционную функцию $R_{Tm}(\tau)$ вместо $R(\tau)$

$$\text{Тогда } \Delta = 4 \cdot \sqrt{\frac{1}{T_m}} \cdot \int_0^{T_m} R^2(\theta) d\theta$$

Следует надеяться на удовлетворительную оценку параметров, описанным выше методом в том случае, когда высота второго максимума (первый максимум имеет место при $\tau=0$) функции превышает уровень ошибки Δ .

В качестве примера противоположной ситуации приведём результаты анализа интенсивной фазы акселерограммы землетрясения. В Дагестане 15 мая 1970 года, компонента С-Ю. Восстанавливающая коррелирующая функция $A(\tau)$ и временная корреляционная функция $R_{Tm}(\tau)$ приведены на рис. 1 и 2, соответственно. Как видно на рис.2, временная корреляционная функция $R_{Tm}(\tau)$ не сможет быть описана выражением (11).

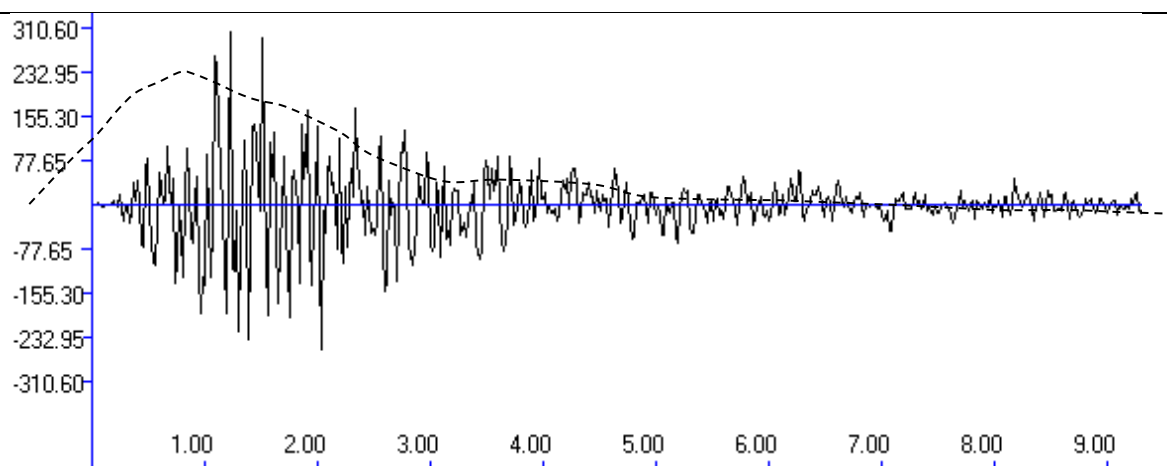


Рис.1. Синтезированная акселерограмма землетрясения в Махачкале 14 мая 1970 года, штриховой линией проведена огибающая процесса колебаний $A(t)$
Fig.1. Synthesized accelerogram of the earthquake in Makhachkala on May 14, 1970, the dashed line shows the envelope of the oscillation process $A(t)$

Такое не соответствие, может быть объяснено высоким уровнем ожидаемой ошибки Δ . Для описания сейсмического воздействия принимается модель случайного процесса, предложенная в работе [4]

Рассмотрим вопрос о возможности оценки параметров модели по существующим экспериментальным данным. Показано, что в ряде случаев простейший метод оценки параметров [4, 11] не может быть реализован. На это обстоятельство необходимо обратить внимание при использовании методов генерации, синтезированных акселерограмм, описанных в работах [2-10, 14-16, 21].

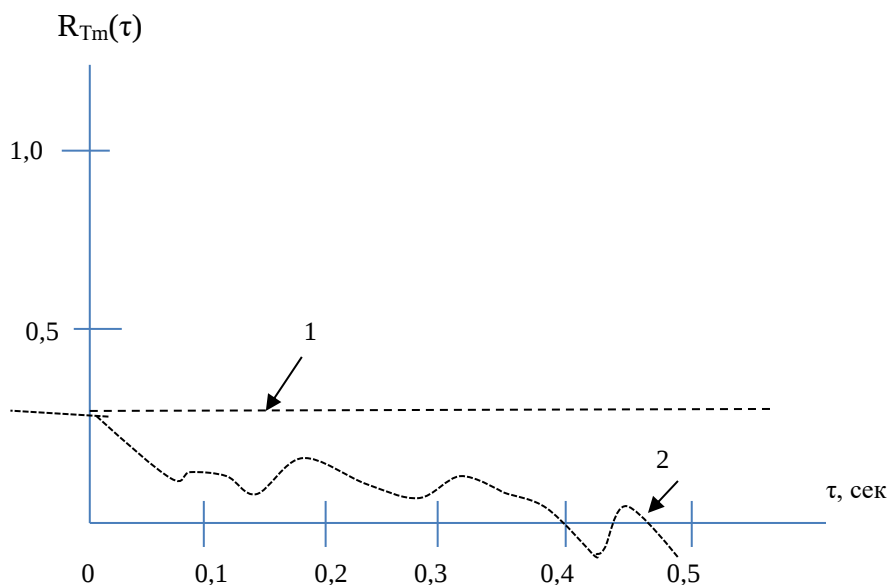


Рис.2. Временная корреляционная функция $R_{Tm}(\tau)$ и уровень ошибки Δ 1 - $R_{Tm}(\tau)$; 2 - Δ
Fig.2. Time correlation function $R_{Tm}(\tau)$ and error level Δ 1 - $R_{Tm}(\tau)$; 2 - Δ

Вывод. Рассмотренные в данной работе методы реализации случайного процесса не являются универсальными и применимы только в конкретных случаях.

Выбор модели сейсмического воздействия, а также аппроксимирующей моделирующей функции должен определяться требуемой степенью надёжности, соответствующей степени ответственности здания. Модель для расчета зданий массовой застройки должна обеспечить сейсмостойкость при строительстве в любом районе с заданной сейсмичностью, а модель для расчета уникальных объектов должна учитывать сейсмологические

данные строительной площадки, при этом задача обеспечения запаса надежности должна быть на первом месте.

Для каждого региона необходимо разработать модель воздействия, учитывающую сейсмологические характеристики территории.

Библиографический список:

1. Болотин В.В. Случайные колебания упругих систем. – М.: Наука. -1979. – 336 с.
2. Санкин Ю.Н. Построение динамических моделей колебательных упругих систем на основе обработки амплитудно-частотных характеристик (АФЧХ) при наличии интегрирующих звеньев в цепи измерения / Вестник УлГТУ. -2008. -№1. – С. 25-31.
3. Диментберг М. Ф. Нелинейные стохастические задачи механических колебаний. М.: Наука, 1980. 368 с.
4. Алфутов Н. А. Основы расчёта на устойчивость упругих систем. М.: Машиностроение, 1991. 336 с.
5. Кулаков А.В., Румянцев А.А. Введение в физику нелинейных процессов. М.: Наука, 1988. 160 с.
6. Ланда П.С. Нелинейные колебания и волны. М.: Наука, 1997. 416 с.
7. Пановко Я.Г. Основы прикладной теории колебаний и удара. Л.: Политехника. 1990. 272 с.
8. Wong H. L., Trifunak M. D. Generation of artificial accelerograms of strong motion /Earthquake in English. – 1979, p. 509-527.
9. Jurkevich A., Ulrych T.J. Autoregressive parameters of a suite of strong motion accelerograms/ Earthquake engineering and structural dynamics. - 1979, vol. 7, p. 407-425.
10. Hsu T.I. Bernard M.S. A random process for earthquake simulation /Earthquake engineering and structural dynamics. - 1978, vol. 6, p. 347-362.
11. Shinazuka M., Sato Y. Simulation of nonstationary random process / J. Engng. Mech. Div. ASCE. - 1967, vol. 93, Emi, p. 11-40.
12. Amin M., Ang A.H.S. Nonstationary stochastic model earthquake motions /J. Engng. Mech. Div. ASCE. - 1968, vol. 94, p. 559-584.
13. Jennings P.S., Housner G.W., Tsai N.C. Simulated earthquake motions for design purposes. – Proc – Fourth World Conf. Earthq. Engng. Chile. – 1969. P. 145-160.
14. Iyengar R.N. Iyengar K.T. A nonstationary random process model for earthquake accelerograms - Bul. Seism. Soc. Am., 1969, vol. 59, 1163-1188.
15. Айзенберг, Я. М. Статистическая расчетная модель сейсмического воздействия на сооружения /Кн. Сейсмическое воздействие на гидротехнические и энергетические сооружения. М.: наука, 1980. С. 5-10.
16. Ньюмарк Н., Розенблют Э. Основы сейсмоактивного строительства. М.: Стройиздат. 1980. С. 61 – 99.
17. Романенко А.Ф., Сергеев Г.А. Вопросы прикладного анализа случайных процессов. М.: Сов. Радио, 1963. С.32.
18. Абакаров, А. Д., Зайнулабидова Х.Р., Курбанов И.Б. Модель сейсмического воздействия для Г. Махачкалы // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2011. – № 3(22). – С. 109-117.
19. Уздин А. М., Л. Н. Смирнова Л.Н., Сорокина Г.В. и др. Статистическое моделирование сейсмических воздействий/ Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2019. – № 5. – С. 19-27.
20. Богданова М.А., Нестерова О.П., Никонова Н.В., Ткаченко А.С., Уздин А.М., Рахманова М., Азаев Т.М., Зайнулабидова Х.Р. / Числовые характеристики сейсмических воздействий. Наука и мир. 2017. Т. 1. № 3 (43). С. 49.
21. Уздин А. М., Смирнова Л. Н., Сорокина Г. В. [и др.]. Статистическое моделирование сейсмических воздействий/ Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2019. – № 5. – С. 19-27.

References:

1. Bolotin V.V. Random oscillations of elastic systems. M.: Science. 1979; 336. [In Russ]
2. Sankin Yu.N. Construction of dynamic models of oscillatory elastic systems based on the processing of amplitude-frequency characteristics (APFC) in the presence of integrating links in the measurement circuit *Bulletin of UIGTU*. 2008;1: 25-31. [In Russ]
3. M. F. Dimentberg, Nonlinear Stochastic Problems of Mechanical Oscillations. M.: Nauka, 1980; 368. [In Russ]
4. N. A. Alfutov, Fundamentals of calculating the stability of elastic systems. M.: Mashinostroenie, 1991; 336. [In Russ]
5. Kulakov A.V., Rumyantsev A.A. Introduction to the physics of nonlinear processes. M.: Nauka, 1988;160. [In Russ]
6. Landa P.S. Nonlinear oscillations and waves. M.: Nauka, 1997; 416. [In Russ]

7. Panovko Ya.G. Fundamentals of Applied Theory of Oscillations and Impact. L.:Polytechnic. 1990; 272 [In Russ]
8. Wong H. L., Trifunak M. D. Generation of artificial accelerograms of strong motion. *Earthquake in English*. 1979; 509-527.
9. Jurkevich A., Ulrych T.J. Autoregressive parameters of a suite of strong motion accelerograms. *Earthquake engineering and structural dynamics*. 1979; 7: 407-425.
10. Hsu T.I. Bernard M.S. A random process for earthquake simulation. *Earthquake engineering and structural dynamics*. 1978; 6:347-362.
11. Shinazuka M., Sato Y. Simulation of nonstationary random process. *J. Engng. Mech. Div. ASCE*. 1967; 93: 11-40.
12. Amin M., Ang A.H.S. Nonstationary stochastic model earthquake motions. *J. engng. Mech. Div. ASCE*. 1968; 94: 559-584.
13. Jennings P.S., Housner G.W., Tsai N.C. Simulated earthquake motions for design purposes. *Proc – Fourth Word Conf. Earthq. engng. Chile*. 1969;145-160.
14. Iyengar R.N. Iyengar K.T. A nonstationary random process model for earthquake accelerograms. *Bul. seism. soc. Am.*, 1969; 59:1163-1188.
15. Aizenberg, Ya. M. Statistical calculation model of seismic impact on structures. Kn. Seismic impact on hydraulic engineering and power structures. M.: Nauka, 1980; 5-10. [In Russ]
16. Newmark N., Rosenbluth E. Fundamentals of seismically active construction. Moscow: Stroyizdat. 1980; 61 - 99. [In Russ]
17. Romanenko A.F., Sergeev G.A. Issues of Applied Analysis of Stochastic Processes. M.: Sov. Radio, 1963; 32. [In Russ]
18. D. Abakarov, Kh. R. Zainulabidova, and I. B. Kurbanov, Russ. Model of seismic impact for G. Makhachkala. *Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science*. 2011; 3(22): 109-117. [In Russ]
19. Uzdin A. M., L. N. Smirnova L. N., Sorokina G. V. etc. Statistical modeling of seismic impacts. *Seismic-resistant construction. Building safety*. 2019; 5:19-27. [In Russ]
20. M. A. Bogdanova, O. P. Nesterova, N. V. Nikonova, A. S. Tkachenko, A. M. Uzdin, M. Rakhmanova, T. M. Azaev, and Kh. Numerical characteristics of seismic impacts. *Science and Peace*. 2017; 1: 3 (43): 49. [In Russ]
21. Uzdin A. M., Smirnova L. N., Sorokina G. V. [et al.]. Statistical modeling of seismic effects. *Seismic construction. Building safety*. 2019; 5:19-27. [In Russ]

Сведения об авторах:

Зайнулабидова Ханзада Рауповна, кандидат технических наук, доцент, заведующая кафедрой архитектуры; hanzada1@mail.ru

Тотурбиева Умуй Джакаевна, кандидат технических наук, доцент, кафедра архитектуры; hanzada1@mail.ru

Джамалудинов Абдулнасыр Магомедович, старший преподаватель, кафедры архитектуры, a-nasir@mail.ru

Information about the authors:

Hanzada R. Zainulabidova, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Head of the Department of Architecture; hanzada1@mail.ru

Umuy Dz. Toturbieva, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Department of Architecture; hanzada1@mail.ru

Abdulnasyr M. Jamaludinov, Senior Lecturer of the Department of Architecture a-nasir@mail.ru

Конфликт интересов/ Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 27.12.2022.

Одобрена после/рецензирования Revised 19.01.2023.

Принята в печать/ Accepted for publication 19.01.2023.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 772.962:699.86

DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-1-174-184

Оригинальная статья / Original Paper

**Выявление скрытых дефектов тепловой защиты зданий
и определение некоторых термических свойств конструкционных строительных
материалов неразрушающим методом тепловидения**

Д.Ф. Карпов, М.В. Павлов, А.Г. Гудков

Вологодский государственный университет,
160000, г. Вологда, ул. Ленина, д. 15, Россия

Резюме. Цель. Целью работы является практическая апробация неразрушающего метода тепловидения для выявления скрытых (невидимых) дефектов и качественного анализа тепловой защиты комплекса строительных объектов в городе Вологде, а также исследования некоторых физических (теплофизических) показателей (коэффициентов теплопроводности, термического сопротивления (теплоизоляции) и теплопередачи) конструкционного строительного материала в виде кирпича силикатного. **Метод.** Основопологающие законы теорий теплопередачи, теплового неразрушающего контроля, инфракрасной и технической диагностики, действующая отечественная нормативно-техническая и нормативно-правовая документация, натурные эксперименты на реальных объектах и лабораторных образцах. **Результат.** Представлены итоги практического определения скрытых дефектов тепловых оболочек комплекса функционирующих в городской среде гражданских и промышленных зданий, теплофизических свойств (коэффициентов теплопроводности, термического сопротивления (теплоизоляции), теплопередачи) современных строительных материалов методами теплового неразрушающего контроля. Определены локации идентифицированных невидимых дефектов тепловой защиты обследуемых строительных объектов и предложены рекомендации по их устранению. Полученные значения теплофизических характеристик для исследуемого конструкционного строительного материала согласуются с данными актуальных нормативных документов. **Вывод.** Показаны особенности неразрушающего метода инфракрасной термографии в определении скрытых дефектов теплозащитных оболочек эксплуатируемых зданий различного функционального назначения и комплекса теплофизических параметров современных конструкционных строительных материалов. Экспериментально подтверждена востребованность тепловидения при проведении энергетических и технических обследований строительных объектов, их отдельных структурных элементов, инженерных систем жизнеобеспечения, а также исследований по уточнению, количественной оценке и прогнозированию различных термических свойств строительных материалов и изделий.

Ключевые слова: тепловидение, строительная термография, инфракрасная термография, тепловой неразрушающий контроль, тепловизионный контроль, тепловизор, термограмма, теплограмма, тепловое изображение, тепловая защита здания, тепловая оболочка здания, тепловой дефект, технический дефект, конструкционный строительный материал, коэффициент теплопроводности, коэффициент термического сопротивления (коэффициент теплоизоляции), коэффициент теплопередачи, кирпич силикатный

Для цитирования: Д.Ф. Карпов, М.В. Павлов, А.Г. Гудков. Выявление скрытых дефектов тепловой защиты зданий и определение некоторых термических свойств конструкционных строительных материалов неразрушающим методом тепловидения. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023; 50(1):174-184. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-1-174-184

Detection of hidden defects of thermal protection of buildings and determination of some thermal properties of structural building materials by Non-destructive Thermal Imaging method

D.F. Karpov, M.V. Pavlov, A.G. Gudkov

Vologda State University,
15 Lenin St., Vologda 160000, Russia

Abstract. Objective. The purpose of the work is the practical approbation of a non-destructive thermal imaging method to identify hidden (invisible) defects and qualitative analysis of the thermal protection of a complex of construction objects in the city of Vologda, as well as the study of some physical (thermophysical) indicators (coefficients of thermal conductivity, thermal resistance (thermal insulation) and heat transfer) of structural building material in the form of silicate brick. **Method.** The fundamental laws of the theory of heat transfer, thermal non-destructive testing, infrared and technical diagnostics, the current domestic regulatory and technical and regulatory documentation, field experiments on real objects and laboratory samples. **Result.** The results of the practical determination of hidden defects in the thermal shells of the complex of civil and industrial buildings functioning in the urban environment, thermophysical properties (coefficients of thermal conductivity, thermal resistance (thermal insulation), heat transfer) of modern building materials by methods of thermal non-destructive testing are presented. The locations of identified invisible defects of thermal protection of the surveyed construction objects are determined and recommendations for their elimination are proposed. The obtained values of thermophysical characteristics for the studied structural building material are consistent with the data of current regulatory documents. **Conclusion.** The features of the non-destructive method of infrared thermography in determining the hidden defects of the heat-shielding shells of operated buildings of various functional purposes and the complex of thermophysical parameters of modern structural building materials are shown. The demand for thermal imaging during energy and technical surveys of construction objects, their individual structural elements, life support engineering systems, as well as studies on the refinement, quantification and prediction of various thermal properties of building materials and products has been experimentally confirmed.

Keywords: thermal imaging, construction thermography, infrared thermography, thermal non-destructive testing, thermal imaging, thermal imager, thermogram, thermal diagram, thermal image, thermal protection of a building, thermal envelope of a building, thermal defect, technical defect, structural building material, thermal conductivity coefficient, thermal resistance coefficient (thermal insulation coefficient), heat transfer coefficient, silicate brick

For citation: D.F. Karpov, M.V. Pavlov, A.G. Gudkov. Detection of hidden defects of thermal protection of buildings and determination of some thermal properties of structural building materials by Non-destructive Thermal Imaging method. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science. 2023; 50(1):174-184. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-1-174-184

Введение. Относительно недавно, такое понятие, как строительная термография, было известно узкому кругу специалистов [1]. Тепловизионный контроль ассоциировался с чем-то сложным и далеким от реальности. В мировой практике строительная тепловизионная диагностика используется с 60-ых годов 20 века. Пионером строительной термографии была шведская фирма AGA (затем AGEMA Infrared Systems), которая в 1998-1999 годы объединилась с американскими фирмами FLIR и Inframetrics, создав к настоящему времени крупнейшую мировую компанию FSI. Скандинавия, Финляндия, Канада и США являются первыми странами, где тепловидение в строительстве нашло широкое практическое применение. Началом внедрения метода в России (СССР) можно считать 60-ые годы 20 века, когда фирма AGA начала осваивать рынок тепловидения и теплового контроля [1–3]. Сегодня современные технологии и оборудование позволяют техническим специа-

листам, работающим в строительной и смежных отраслях промышленности и производства, в полной мере применять термографирование в повседневной профессиональной деятельности [4–16]. Для этого применяются измерительные приборы – тепловизоры, которые «видят» тепловое инфракрасное излучение контролируемых объектов [17–31]. Матрица прибора способна воспринимать излучение и в виде электронных сигналов передавать эту информацию в микропроцессор, который непосредственно обрабатывает и пересчитывает ее в температуру и выводит на дисплей прибора в виде цветной картинки – термограммы (теплограммы), где каждому цвету соответствует своя температура. Таким образом, тепловизор создает тепловое изображение практически любого теплогенерирующего и/или теплопотребляющего объекта (рис. 1). Во многом принцип работы тепловизора похож на работу обычного цифрового фотоаппарата. Кроме того, основные части этих приборов тоже одинаковы: корпус, объектив, матрица и ряд других составляющих. Принципиальная разница этих приборов в том, что цифровая камера фиксирует реальное изображение объекта, а инфракрасная камера-тепловизор – тепловое, и позволяет пользователю анализировать температурное поле объекта контроля [1, 4, 13, 21].



Рис. 1. Примеры и результаты наружного оперативного контроля тепловой защиты гражданских зданий неразрушающим методом строительной термографии
(информация из открытых (свободных) источников сети Интернет)

Fig. 1. Examples and results of external operational control of thermal protection of civil buildings by non-destructive method of building thermography (information from open (free) sources on the Internet)

Обладая способностью «видеть» теплоту, тепловизоры активно применяются в строительной сфере при выявлении дефектов, под которыми в широком смысле понимают каждое отдельное несоответствие продукции требованиям нормативной технической документации в соответствующей области. Дефекты ограждающих конструкций приводят к нарушению теплоизоляции, способствуя образованию избыточных тепловых потерь, являющихся маркером качества строительства с точки зрения энергосбережения и энергоэффективности функционирования инженерных систем и оборудования, а также всего здания в целом [5–10]. Следует отметить, что применение тепловизионной техники в строительстве уже вышло за рамки диагностики только ограждающих конструкций зданий и идентификации теплотехнических дефектов. Тепловизоры все более активно используются при обследовании инженерных систем жизнеобеспечения и поиске локаций технических коммуникаций в стенах и перекрытиях строительных объектов. Например, с помощью тепловизора в онлайн-режиме можно провести диагностику эксплуатируемых систем горячего водоснабжения, теплых полов, электроснабжения под напряжением [1, 13, 20].

Тепловизионная диагностика объектов контроля любого назначения подразумевает комплекс работ, требующих наличия не только соответствующего приборно-измерительного оборудования, но и квалифицированного специалиста или группы специалистов. Итоговой частью тепловизионного контроля, как правило, является отчет о выполненной работе. В США, Швеции, Финляндии утверждены национальные стандарты и разработаны инструктивные указания (guidelines) по строительному тепловидению. В Европе действует стандарт ISO 6781-83, который вводит соответствующую терминологию и определяет самые общие положения. В России первый нормативный документ по тепловизионному контролю появился в 1985 году (ГОСТ «Метод тепловизионного контроля качества теплоизоляции ограждающих конструкций»). В 2021 году под прежним названием опубликован обновленный национальный стандарт (ГОСТ Р). Особенностью

процесса тепловизионного контроля является то, что он может быть обзорным или детальным (рис. 2).



Рис. 2. Примеры и результаты онлайн-определения дефектов тепловой защиты зданий, инженерных систем жизнеобеспечения в процессе наружного обзорного и внутреннего детального термографирования (информация из открытых (свободных) источников сети Интернет)

Fig. 2. Examples and results of online determination of defects in the thermal protection of buildings, engineering life support systems in the process of external overview and internal detailed thermography (information from open (free) sources on the Internet)

Под обзорным термографированием понимают тепловизионную съемку наружных и/или внутренних поверхностей ограждающих конструкций с сохранением термограмм в памяти тепловизора и/или на внешних съемных носителях памяти и с обязательным составлением отчета о термографическом обследовании.

При детальном термографировании выполняют тепловизионную съемку выделенных участков наружных и/или внутренних поверхностей ограждающих конструкций с последующим аналогичным сохранением термограмм и составлением итогового отчета [4, 27]. При тепловизионном обследовании, кроме тепловизора, также может применяться и другое оборудование, к которому относятся: термодатчики, пирометры, измерители теплопроводности и плотности материалов, измерители плотности тепловых потоков, термокраски, термокарандаши, иные вспомогательные инструменты и приборы. Например, принцип действия пирометра, как и тепловизора, основан на измерении мощности теплового излучения объекта преимущественно в диапазоне инфракрасного излучения и видимого света. Однако тепловизор позволяет получить температуру множества точек поверхности объекта, а пирометр – в одной точке.

Из очевидных достоинств тепловидения выделим следующие: безопасность и возможность проведения тепловизионной съемки на расстоянии, возможность тепловизионного контроля в режиме реального времени, достоверность и точность получаемых результатов, многофункциональность специализированного программного обеспечения при качественной обработке термограмм, применение неразрушающего метода инфракрасной термографии в особых климатических зонах и условиях [18].

Постановка задачи. В исследовании поставлены две задачи, требующие решения:

1. Выявление тепловых дефектов и качественный анализ тепловой защиты комплекса строительных объектов в городе Вологде по результатам их тепловизионного контроля.

2. Определение (количественная оценка) некоторых термических показателей (коэффициентов теплопроводности, термического сопротивления (теплоизоляции) и теплопередачи) конструкционного строительного изделия в виде кирпича силикатного по результатам термографирования фрагмента стены здания.

Решение задач реализуется в натурных экспериментальных условиях на реальных объектах и образцах лабораторной установки. Основные стадии тепловизионного контроля зданий: изучение генерального и ситуационного планов местности расположения объектов контроля; ознакомление с проектно-технической документацией обследуемых объектов контроля; планирование и проведение термографирования объектов контроля; создание базы данных фотоизображений и термограмм по результатам термографирования; качественный анализ результатов термографирования объектов контроля (обработка и расшифровка термограмм).

Основные этапы тепловизионного контроля фрагмента стены здания из кирпича силикатного: планирование эксперимента; подготовка лабораторной установки; предвари-

тельный нагрев контролируемого объекта; подготовка и проведение тепловизионного обследования; формирование базы данных фотоизображений и термограмм; качественный и количественный анализ тепловых изображений. Перед проведением тепловизионного контроля объекты термографирования не должны подвергаться воздействию внешними источниками теплоты, в том числе прямыми и отраженными солнечными лучами. Время условной «выдержки» перед термографированием должно составлять не менее 12 часов.

Методы исследования. Научной основой работы являются фундаментальные положения теорий теплообмена и теплового неразрушающего контроля, технической и инфракрасной диагностики, способы качественно-количественной оценки термограмм. Применяемые методы получения, обработки и анализа результатов исследования базируются на действующих нормативных технических и правовых документах России, федеральных законах, современных и актуальных научных работах, изобретениях отечественных и зарубежных авторов, классических учебных и справочных материалах.

Обсуждение результатов. Натурные эксперименты на реальных объектах. Одним из наиболее часто встречающихся дефектов панельных зданий является нарушение теплоизоляции монтажных швов, приводящие к промерзанию стен и перекрытий, что влечет за собой дискомфортные условия проживания для собственников жилья и развитие биокоррозии на внутренних поверхностях наружных стен. При этом внешне такие дефекты не видны. Тепловизионный контроль позволяет выявлять такие нарушения и принимать меры для их своевременного устранения. По такому же принципу могут быть выявлены другие наружные дефекты ограждающих конструкций: дефекты теплоизоляции цокольных этажей и подвальных помещений, дефекты установки стеклопакетов и кровли т др. На рис. 3 представлены идентифицированные дефекты тепловой защиты комплекса зданий.

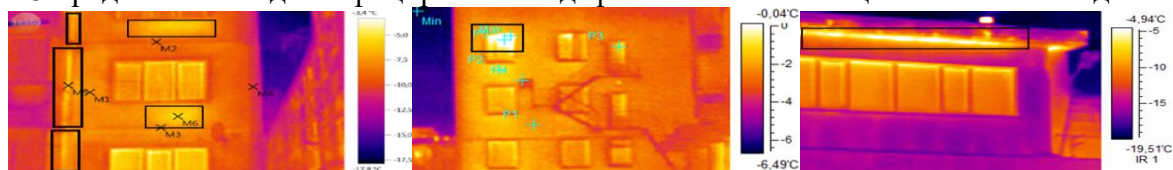


Рис. 3. Примеры качественного анализа термограмм по результатам наружной тепловизионной съемки ограждающих конструкций гражданских и промышленных зданий
(© Д.Ф. Карпов, М.В. Павлов, А.Г. Гудков)

Fig. 3. Examples of qualitative analysis of thermograms based on the results of outdoor thermal imaging of enclosing structures of civil and industrial buildings
(© D.F. Karpov, M.V. Pavlov, A.G. Gudkov)

Не менее значимым видом обследования ограждающих конструкций зданий является внутренняя съемка. Такой вид инфракрасной диагностики позволяет выявить участки – «мостики холода», возникающие из-за дефектов теплоизоляции, которые приводят к тепловым потерям и могут иметь температуру ниже точки росы. В свою очередь, участки с температурой ниже точки росы приводят к конденсации влаги и промерзанию ограждающих конструкций, что является дефектом с точки зрения нормативно-технической документации в сфере строительства. Функциональные возможности современных тепловизионных устройств и сопутствующего специализированного программного обеспечения позволяют выделять на термограммах участки с температурой ниже точки росы, визуализировать эти области и принимать оперативные решения по устранению дефектов.

На рис. 4 показаны выявленные дефекты участков ограждающих конструкций комплекса зданий в виде «мостиков холода». Тепловизионная диагностика также позволяет визуально контролировать работу инженерных систем здания, например, отопления и теплоснабжения зданий. Данная возможность тепловидения прочно заняла свою нишу в строительной термографии. Тепловизирование таких систем обеспечивает выявление температурных полей, засоров и дефектов радиаторов, а также позволяет определять фактический массовый расход теплоносителя через отопительный прибор [20].

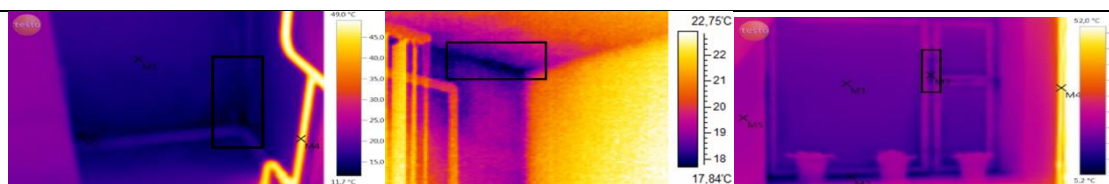


Рис. 4. Примеры качественного анализа термограмм по результатам внутренней тепловизионной съемки ограждающих конструкций жилых и общественных зданий
(© Д.Ф. Карпов, М.В. Павлов, А.Г. Гудков)

Fig. 4. Examples of qualitative analysis of thermograms based on the results of internal thermal imaging of enclosing structures of residential and public buildings
(© D.F. Karpov, M.V. Pavlov, A.G. Gudkov)

На рис. 5 изображены обнаруженные дефекты систем отопления и теплоснабжения в виде «мостиков холода» в месте входа стояка в междуэтажное перекрытие, нарушения теплоизоляции системы теплоснабжения и засора одной из секций радиатора отопления.

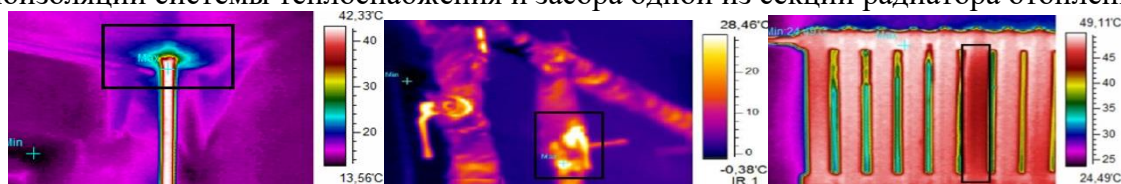


Рис. 5. Примеры качественного анализа термограмм по результатам внутренней тепловизионной съемки инженерных систем и установок жилых и общественных зданий
(© Д.Ф. Карпов, М.В. Павлов, А.Г. Гудков)

Fig. 5. Examples of qualitative analysis of thermograms based on the results of internal thermal imaging of engineering systems and installations of residential and public buildings
(© D.F. Karpov, M.V. Pavlov, A.G. Gudkov)

На рис. 3, 4, 5 локации выявленных на термограммах дефектов отмечены черными прямоугольниками. Теплотехнические дефекты устраняются, как правило, повторной и/или дополнительной теплоизоляцией и/или герметизацией известными классическими или инновационными утеплителями и герметиками [4, 6, 10, 14, 16, 18], а засоры секций конвективно-радиационных отопительных приборов – например, методом гидравлической или химической очистки [16, 18, 20]. Натурные лабораторные эксперименты на образцах. Экспериментальная установка, схема и алгоритм определения ключевых термических свойств – коэффициентов теплопроводности, термического сопротивления (теплоизоляции) и теплопередачи конструкционных строительных материалов и изделий неразрушающими методами строительной термографии подробно изложены в [4]. На рис. 6 представлены термограммы поверхностей фрагмента стены здания из силикатных кирпичей (кирпич строительный 3-х пустотный М150 по ГОСТ 379-2015 «Кирпич, камни, блоки и плиты перегородочные силикатные»).

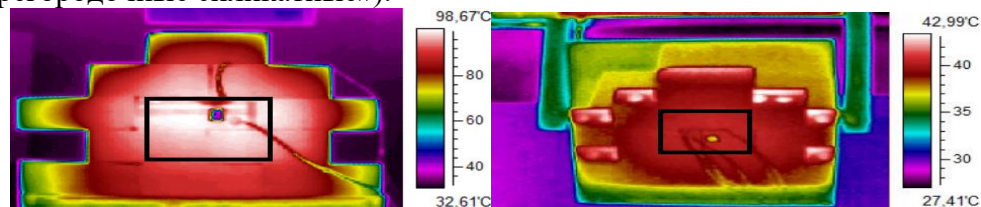


Рис. 6. Термограммы поверхностей фрагмента стены здания из силикатных кирпичей: слева – передняя поверхность стенки ($x = 0$), справа – задняя поверхность стенки ($x = \delta$)
(© Д.Ф. Карпов, М.В. Павлов, А.Г. Гудков)

Fig. 6. Thermograms of the surfaces of a fragment of a building wall made of silicate bricks: on the left - the front surface of the wall ($x = 0$), on the right - the back surface of the wall ($x = \delta$)
(© D.F. Karpov, M.V. Pavlov, A.G. Gudkov)

Выбор термограмм поверхностей фрагмента стенки здания из кирпичей силикатных выполнен с учетом их качества для получения объективной и достоверной информации о температурных полях поверхностей объекта контроля. По результатам серии экспериментов на лабораторной установке представлены расчетные значения коэффициентов

теплопроводности, термического сопротивления (теплоизоляции) и теплопередачи кирпича силикатного (табл.1).

Таблица 1. Экспериментально-расчетные значения теплофизических характеристик (теплопроводности (λ_t), теплоизоляции (R) и теплопередачи (k)) кирпича силикатного
Table 1. Experimental and calculated values of thermophysical characteristics (thermal conductivity (λ_t), thermal insulation (R) and heat transfer (k)) of silicate brick

№ п/п	q , Вт/м ²	δ , м	t_0 , °С	t_δ , °С	λ_t , Вт/(м·°С)	R , (м ² ·°С)/Вт	k , Вт/(м ² ·°С)
1	385	0,120	98,5	40,0	0,79	0,152	6,579
2			97,4	40,3	0,81	0,148	6,757
3			94,2	41,1	0,87	0,138	7,246
Средние значения $\lambda_{t, av}$, Вт/(м·°С), R_{av} , (м ² ·°С)/Вт, k_{av} , Вт/(м ² ·°С)					0,82	0,146	6,861

Полученное экспериментально-расчетным методом теплового неразрушающего контроля среднее значение коэффициента теплопроводности кирпича силикатного согласуется с нормативной величиной (СП «Проектирование тепловой защиты зданий»).

Полученные экспериментально-расчетным способом термические показатели позволяет количественно оценить теплотехнические показатели ограждающих конструкций зданий, определить фактические тепловые потери через наружные ограждения, проверить расчетные и конструктивные решения, сравнить их с нормативными требованиями [6, 10, 12, 19, 32, 33].

В порядке обсуждения результатов исследования и потенциальной дискуссии авторы работы выносят следующие утверждения:

1. Неразрушающими методами инфракрасной термографии идентифицированы невидимые дефекты тепловой защиты комплекса зданий в городе Вологде. По результатам тепловизионного контроля выполнен качественный анализ полученных термограмм и выявлены локации теплотехнических дефектов, варианты устранения которых, подробно изложены в [4, 6, 8, 10, 13].

2. Неразрушающие методы тепловидения в режиме реального времени позволяют безопасно и быстро выполнять анализ и техническую диагностику текущего состояния объектов строительства и отдельных структурных элементов зданий, проводить оценку энергоэффективности их функционирования, а также разрабатывать энергосберегающие мероприятия [2, 3, 15].

3. Тепловизионный мониторинг обеспечивает возможность непрерывной диагностики теплозащитных оболочек контролируемых объектов строительства в процессе их эксплуатации, обнаружения мест локализации скрытых (невидимых) дефектов на всех стадиях появления с последующей разработкой мероприятий по их устранению и, соответственно, уменьшения стоимости технических обследований [1–18, 20–31].

4. Неразрушающим методом тепловизионного контроля определены некоторые теплофизические показатели (коэффициенты теплопроводности, термического сопротивления (теплоизоляции) и теплопередачи) конструкционного строительного изделия в виде кирпича силикатного.

5. Экспериментальная установка [4, 8, 12] позволяет неразрушающим методом тепловидения исследовать и другие фактические значения термических показателей конструкционных, тепло- и гидроизоляционных строительных материалов и готовых изделий: температуропроводности, теплового (температурного) расширения, тепловой инерции и др.

Вывод. Результатом исследования является демонстрация возможностей и специфики неразрушающих методов инфракрасной термографии в идентификации скрытых дефектов теплозащитных оболочек зданий различного назначения и количественной оценке (уточнении) комплекса теплофизических свойств современных конструкционных материалов. Тепловидение является актуальным и инновационным методом обследования зданий, сооружений и их отдельных элементов, дает возможность качественно и количе-

ственно оценить уровень энергоэффективности строительных объектов и работу различного технологического оборудования, анализировать техническое состояние строительных конструкций, выполнять поиск скрытых дефектов.

Неразрушающие методы и средства тепловизионного контроля находят все более активное практико-ориентированное применение в следующих производственно-промышленных сферах жизнедеятельности: энергетика, машиностроение, металлургия, транспорт, электроснабжение, теплоснабжение и др. [1, 13, 17]

Библиографический список:

1. Основы современной строительной термографии / Е. В. Левин, А. Ю. Окунев, Н. П. Умнякова, И. Л. Шубин; под общ. ред. И. Л. Шубина. – Москва: НИИСФ РААСН. – 2012. – 176 с.
2. Шашков, А. Ф. Инновационные методы обследования зданий и сооружений / А. Ф. Шашков, О. С. Гамаюнова // Высокие технологии в строительном комплексе. – 2022. – № 2. – С. 136-146.
3. Чакин, Е. Ю. Современные тенденции повышения энергоэффективности зданий / Е. Ю. Чакин, О. С. Гамаюнова // Неделя науки ИСИ: Материалы всероссийской конференции в 3-х частях, Санкт-Петербург, 26-30 апреля 2021 года / Инженерно-строительный институт Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. Том Часть 2. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. – 2021. – С. 212-215.
4. Карпов, Д. Ф. Специфика комплексного тепловизионного мониторинга современных гражданских зданий и теплофизических свойств ограждающих конструкций из строительных материалов массового производства / Д. Ф. Карпов, М. В. Павлов, А. Г. Гудков // Вестник ДГТУ. Технические науки. – 2021. – Т. 48. – № 4. – С. 147 – 158. DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-4-147-158.
5. Игнатюк, А. С. Информационная система тепловизионного обследования конструкций здания / А. С. Игнатюк, С. Д. Николенко, С. А. Сазонова // Информационные технологии в строительных, социальных и экономических системах. – 2021. – № 2 (24). – С. 88-94.
6. Павлов, М. В. Анализ результатов энергетического обследования общественного здания на примере стоматологической поликлиники / М. В. Павлов, Д. Ф. Карпов, А. Г. Гудков // Научно-технический журнал «Энергосбережение и водоподготовка». – 2022. – № 5 (139). – С. 28-32.
7. Использование тепловизионной съемки для поиска скрытых дефектов / В. А. Шинкевич, Д. А. Гресь, И. И. Еремеев [и др.] Актуальные проблемы военно-научных исследований. – 2020. – № 6 (7). – С. 285-295.
8. Карпов, Д. Ф. Применение активного и пассивного теплового контроля в дефектоскопии строительных материалов и изделий, ограждающих конструкций зданий и сооружений / Д. Ф. Карпов // Строительные материалы и изделия, 2019. – Т. 2. – № 4. – С. 39-44.
9. Развитие и особенности диагностики строительных конструкций с применением тепловизионной съемки / А. И. Бедов, А. И. Габитов, А. С. Салов [и др.] // Строительство и реконструкция. – 2020. – № 1 (87). – С. 59-70. – DOI 10.33979/2073-7416-2020-87-1-59-70.
10. Павлов, М. В. Анализ результатов тепловизионного обследования гражданского здания общественного назначения / М. В. Павлов, Д. Ф. Карпов, А. Г. Гудков // Научно-технический журнал «Энергосбережение и водоподготовка». – 2022. – № 2 (136). – С. 35-39.
11. Султамуратов, Н. Н. Применение метода термографии для определения технического состояния строительных конструкций / Н. Н. Султамуратов, Д. В. Цыгулев // Инновационные подходы в современной науке: сборник статей по материалам XLIV международной научно-практической конференции, Москва, 19 апреля 2019 года. Том 8 (44). – Москва: Общество с ограниченной ответственностью «Интернаука». – 2019. – С. 114-118.
12. Карпов Д.Ф. Активный метод теплового контроля теплопроводности строительных материалов и изделий// Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова, 2019.–№7.–С.57-62doi:10.34031/article_5d35d0b79c34c5.75173950.
13. Вавилов, В. П. Тепловидение и тепловой контроль для инженеров. Изд. 1-е. Москва: Издательский дом «СПЕКТР». – 2017. – 72 с.
14. Карпов, Д. Ф. Оценка теплозащитных свойств ограждающих конструкций строительных объектов по анализу термограмм / Д. Ф. Карпов, М. В. Павлов // Вестник ДГТУ. Технические науки. – 2021. – Т. 48. – № 2. – С. 92-102. DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-2-92-102.
15. Пешков, А. А. Применение современных средств термографии для оценки энергоэффективности строительных объектов / А. А. Пешков, Н. М. Анисимов // Научный вклад молодых исследователей в сохранение традиций и развитие АПК : Сборник научных трудов Международной научно-практической конференции молодых учёных и студентов, Санкт-Петербург-Пушкин, 31 марта – 01 2016 года. Том Часть I. – Санкт-Петербург-Пушкин: Санкт-Петербургский государственный аграрный университет. – 2016. – С. 249-252.

16. Карпов, Д. Ф. Алгоритм комплексной диагностики технического состояния строительных конструкций по анализу термограмм // Строительные материалы и изделия. – 2019. – Т. 2. – № 2. – С. 23-28.
17. Власов, А. Б. Оценка тепловых потоков технологического оборудования методом количественной термографии / А. Б. Власов, Ю. В. Шокина, К. Б. Аллюров // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2012. – № 26. – С. 414-421.
18. Карпов, Д. Ф. Эколого-экономические аспекты ресурсосберегающих технологий строительства и эксплуатации энергоэффективных зданий в особых климатических зонах / Д.Ф. Карпов, М.В. Павлов // Проблемы экономического роста и устойчивого развития территорий: материалы VII международной науч.-практ. интернет-конференции, г. Вологда, 11-13 мая 2022 г. – Вологда: Вологодский научный центр РАН. – 2022. – С. 375-378.
19. Желнин, М. С. Определение теплофизических констант материала на основе метода инфракрасной термографии / М. С. Желнин, А. Ю. Изюмова, О. А. Плехов // Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций : Сборник материалов, Екатеринбург, 16–20 мая 2016 года. – Екатеринбург: ИМАШ УрО РАН. – 2016. – С. 306-307.
20. Тепловизионный метод определения расхода воды через отопительный прибор / М. В. Павлов, Д. Ф. Карпов, В. А. Агафонов [и др.] // Научно-технический журнал «Инженерные системы». «АВОК – Северо-Запад». – Санкт-Петербург. – 2017. – № 4. – С. 34-36.
21. Lucchi, E. Applications of the infrared thermography in the energy audit of buildings: A review / E. Lucchi // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2018. – Vol. 82. – Pp. 3077-3090. – DOI 10.1016/j.rser.2017.10.031.
22. Comparative analysis of infrared thermography and CFD modelling for assessing the thermal performance of buildings / C. Morón, D. Ferrández, R. Felices, P. Saiz // Energies. – 2018. – Vol. 11. – No. 3. – P. 638. – DOI 10.3390/en11030638.
23. A model for the improvement of thermal bridges quantitative assessment by infrared thermography / G. Baldinelli, F. Bianchi, A. Rotili [et al.] // Applied Energy. – 2018. – Vol. 211. – Pp. 854-864. – DOI 10.1016/j.apenergy.2017.11.091.
24. Locating hidden elements in walls of cultural heritage buildings by using infrared thermography / H. Glavaš, T. Barić, M. Hadzima-Nyarko, I. H. Buljan. Buildings. 2019;2:32. – DOI 10.3390/buildings9020032.
25. Improving the detection of thermal bridges in buildings via on-site infrared thermography: The potentialities of innovative mathematical tools / S. Sfarra, S. Perilli, A. Ciccone [et al.] // Energy and Buildings. – 2019. – Vol. 182. – Pp. 159-171. – DOI 10.1016/j.enbuild.2018.10.017.
26. Heat loss from defects of hinged facade systems of buildings / A. E. Rusanov, A. Kh. Baiburin, D. A. Baiburin, V. Bianco. Magazine of Civil Engineering. 2020;3 (95):57-65. – DOI 10.18720/MCE.95.6.
27. Thermographic methodologies used in infrastructure inspection: A review-Post-processing procedures / I. Garrido, R. Otero, P. Arias, S. Lagüela. Applied Energy. 2020;266:114857. – DOI 10.1016/j.apenergy.2020.114857.
28. Kolesnichenko, S. Detection of dangerous defects and damages of steel building structures by active thermography / S. Kolesnichenko, A. Popadenko, Y. Selyutyn // Materials Science Forum. – 2021. – Vol. 1038 MSF. – Pp. 417-423. – DOI 10.4028/www.scientific.net/MSF.1038.417.
29. Building envelope modeling calibration using aerial thermography / N. Bayomi, S. Nagpal, T. Rakha, J. E. Fernandez // Energy and Buildings. – 2021. – Vol. 233. – P. 110648. – DOI 10.1016/j.enbuild.2020.110648.
30. Golovin, Y. I. Dynamic Thermography for Technical Diagnostics of Materials and Structures / Y. I. Golovin, D. Y. Golovin, A. I. Tyurin // Russian metallurgy (Metally). – 2021. – Vol. 2021. – No. 4. – Pp. 512-527. – DOI 10.1134/S0036029521040091.
31. Milovanović, B. Principal component thermography for defect detection in concrete / B. Milovanović, M. Gaši, S. Gumbarević // Sensors. – 2020. – Vol. 20. – No. 14. – Pp. 1-21. – DOI 10.3390/s20143891.
32. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022611427. Программа для оценки соответствия теплозащитной оболочки жилого здания нормативным требованиям: № 2022610724: заявл. 25.01.2022: опубл. 25.01.2022. Бюл. № 2 / М. В. Павлов, Д. Ф. Карпов, В. А. Писаренко, С. В. Клопов, В. П. Жукова; правообладатель ВоГУ.
33. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022662093. Программа для оценки относительного сопротивления теплопередаче в различных точках ограждающей конструкции: № 2022660450: заявл. 09.06.2022: опубл. 29.06.2022. Бюл. № 7 / М. В. Павлов, Д. Ф. Карпов; правообладатель ВоГУ.

References:

1. The basics of modern construction thermography/E. V. Levin, A. Yu. Okunev, N. P. Umnyakova, I. L. Shubin; under the general. ed. I. L. Shubin. – Moscow: NIISF RAASN. 2012;176. (In Russ.).
2. Shashkov, A. F. Innovative methods for surveying buildings and structures / A. F. Shashkov, O. S. Gamayunova. *High technologies in the construction complex*. 2022; 2:136-146. (In Russ.).

3. Chakin, E. Yu. Modern trends in improving the energy efficiency of buildings / E. Yu. Chakin, O. S. Gamayunova . ISI Science Week: Materials of the All-Russian Conference in 3 Parts, St. Petersburg, April 26-30, 2021. *Engineering and Construction Institute of St. Petersburg Polytechnic University Peter the Great*. Volume Part 2. – St. Petersburg: St. Petersburg Polytechnic University of Peter the Great". 2021; 212-215. (In Russ.).
4. Karpov, D. F. Specifics of integrated thermal imaging monitoring of modern civil buildings and thermophysical properties of enclosing structures made of mass-produced building materials. D. F. Karpov, M. V. Pavlov, A. G. Gudkov. *Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences*. 2021; 48(4):. 147-158. DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-4-147-158. (In Russ.).
5. Ignatyuk, A. S. Information system for thermal imaging examination of building constrictions / A. S. Ignatyuk, S. D. Nikolenko, S. A. Sazonova. *Information technologies in construction, social and economic systems*. 2021; 2 (24):88-94. (In Russ.).
6. Pavlov, M. V. Analysis of the results of an energy survey of a public building on the example of a dental clinic / M. V. Pavlov, D. F. Karpov, A. G. Gudkov. *Scientific and technical journal "Energy saving and water treatment"*. 2022; 5 (139): 28-32. (In Russ.).
7. Using thermal imaging to search for hidden defects / V. A. Shinkevich, D. A. Gres, I. I. Ereemeev [and others] *Actual problems of military-scientific research*. 2020; 6 (7): 285-295. (In Russ.).
8. Karpov, D. F. Application of active and passive thermal control in defective toscopy of building materials and products, enclosing structures of buildings and structures. *Construction materials and products*, 2019; 2(4): 39-44. (In Russ.).
9. Development and peculiarities of diagnostics of building structures using thermal imaging / A. I. Bedov, A. I. Gabitov, A. S. Salov [and others] *Construction and reconstruction*. 2020;1 (87):59-70. – DOI 10.33979/2073-7416-2020-87-1-59-70. (In Russ.).
10. Pavlov, M. V. Analysis of the results of a thermal imaging survey of a civilian public building / M. V. Pavlov, D. F. Karpov, A. G. Gudkov. *Scientific and technical journal "Energy saving and water treatment"*. 2022; 2 (136): 35-39. (In Russ.).
11. Sultamuratov, N. N. Application of the thermography method to determine the technical state of building structures / N. N. Sultamuratov, D. V. Tsygulev // *Innova approaches in modern science: a collection of articles on the materials of the XLIV international scientific and practical conference, Moscow, April 19, 2019.*– Moscow: Internauca Limited Liability Company. 2019; 8 (44). 114-118. (In Russ.).
12. Karpov, D. F. Active method of thermal control of thermal conductivity of building materials and products *Bulletin of BSTU named after V. G. Shukhova*, 2019;7:57-62. doi:10.34031/article_5d35d0b79c34c5.75173950. (In Russ.).
13. Vavilov, V. P. Thermal vision and thermal control for engineers. Ed. 1st. Moscow: SPEKTR Publishing House. 2017;72. (In Russ.).
14. Karpov, D. F. Assessment of the thermal protection properties of the enclosing structures of building objects based on the analysis of thermograms. D. F. Karpov, M. V. Pavlov. *Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences*. 2021; 48(2):92-102. DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-2-92-102. (In Russ.).
15. Peshkov, A. A. The use of modern thermography tools to assess the energy efficiency of construction facilities / A. A. Peshkov, N. M. Anisimov. Scientific contribution of young researchers to the preservation of traditions and the development of the agro-industrial complex: Collection of scientific works of the International Scientific and Practical Conference of Young Scientists and Students, St. Petersburg-Pushkin, March 31 – 01, 2016. Volume Part I. – St. Petersburg-Pushkin: St. Petersburg State Agrarian University. 2016; 249-252. (In Russ.).
16. Karpov, D. F. Algorithm for comprehensive diagnostics of the technical condition of building structures based on thermogram analysis. *Construction materials and products*. 2019; 2(2): 23-28. (In Russ.).
17. Vlasov, A. B. Assessment of heat flows of technological equipment by the method of quantitative thermography / A. B. Vlasov, Yu. V. Shokin, K. B. Alloyarov. *Izvestia of St. Petersburg State Agrarian University*. 2012; 26: 414-421. (In Russ.).
18. Karpov, D. F. Ecological and economic aspects of resource-saving technologies for the construction and operation of energy-efficient buildings in special climatic zones / D. F. Karpov, M. V. Pavlov // *Problems of economic growth and sustainable development of territories: materials of the VII international scientific practice. Internet conferences, Vologda, May 11-13, 2022 – Vologda: Vologda Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2022; 375-378. (In Russ.).
19. Zhelnin, M. S. Determination of thermophysical constants of a material based on an infra-red thermography method / M. S. Zhelnin, A. Yu. Izyumova, O. A. Plekhov. Mechanics, resource and diagnostics of materials and structures: Collection of materials, Yekaterinburg, May 16-20, 2016. – Yekaterinburg: IMASH UrO RAS. 2016; 306-307. (In Russ.).
20. Thermal imaging method for determining water consumption through a heating device / M. V. Pavlov, D. F. Karpov, V. A. Agafonov [and others]. *Scientific and technical journal "Engineering Systems". "AVOK – North-West"*. St. Petersburg. 2017; 4: 34-36. (In Russ.).

21. Lucchi, E. Applications of the infrared thermography in the energy audit of buildings: A review / E. Lucchi *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018;82: 3077-3090. – DOI 10.1016/j.rser.2017.10.031.
22. Comparative analysis of infrared thermography and CFD modelling for assessing the thermal performance of buildings / C. Morón, D. Ferrández, R. Felices, P. Saiz. *Energies*. 2018; 11(3):638. – DOI 10.3390/en11030638.
23. A model for the improvement of thermal bridges quantitative assessment by infrared thermography / G. Baldinelli, F. Bianchi, A. Rotili [et al.]. *Applied Energy*. 2018;211:854-864. – DOI 10.1016/j.apenergy.2017.11.091.
24. Locating hidden elements in walls of cultural heritage buildings by using infrared thermography / H. Glavaš, T. Barić, M. Hadzima-Nyarko, I. H. Buljan. *Buildings*. 2019; 9(2):32. – DOI 10.3390/buildings9020032.
25. Improving the detection of thermal bridges in buildings via on-site infrared thermography: The potentialities of innovative mathematical tools / S. Sfarra, S. Perilli, A. Ciccone [et al.]. *Energy and Buildings*. 2019; 182: 159-171. – DOI 10.1016/j.enbuild.2018.10.017.
26. Heat loss from defects of hinged facade systems of buildings / A. E. Rusanov, A. Kh. Baiburin, D. A. Baiburin, V. Bianco. *Magazine of Civil Engineering*. 2020; 3 (95): 57-65. – DOI 10.18720/MCE.95.6.
27. Thermographic methodologies used in infrastructure inspection: A review-Post-processing procedures / I. Garrido, R. Otero, P. Arias, S. Lagüela. *Applied Energy*. 2020;266:114857. – DOI 10.1016/j.apenergy.2020.114857.
28. Kolesnichenko, S. Detection of dangerous defects and damages of steel building structures by active thermography / S. Kolesnichenko, A. Popadenko, Y. Selyutyn. *Materials Science Forum*. 2021; 1038: 417-423. – DOI 10.4028/www.scientific.net/MSF.1038.417.
29. Building envelope modeling calibration using aerial thermography / N. Bayomi, S. Nagpal, T. Rakha, J. E. Fernandez. *Energy and Buildings*. 2021; 233:110648. – DOI 10.1016/j.enbuild.2020.110648.
30. Golovin, Y. I. Dynamic Thermography for Technical Diagnostics of Materials and Structures / Y. I. Golovin, D. Y. Golovin, A. I. Tyurin. *Russian metallurgy (Metally)*. 2021;4:512-527. – DOI 10.1134/S0036029521040091.
31. Milovanović, B. Principal component thermography for defect detection in concrete / B. Milovanović, M. Gaši, S. Gumbarević. *Sensors*. 2020; 20(14): 1-21. – DOI 10.3390/s20143891.
32. Computer Program State Registration Certificate No. 2022611427. Program to assess the compliance of the thermal containment of a residential building with regulatory requirements: No. 2022610724: declared 25.01.2022: publ. 25.01.2022; 2. M. V. Pavlov, D. F. Karpov, V. A. Pisarenko, S. V. Klopov, V. P. Zhukova; right holder of VoSU. (In Russ.).
33. Computer Program State Registration Certificate No. 2022662093. Program for evaluating the relative resistance to heat transfer at various points of the enclosing structure: No. 2022660450: declared 09.06.2022: publ. 29.06.2022. Bull. No. 7 / M. V. Pavlov, D. F. Karpov; right holder of VoSU. (In Russ.).

Сведения об авторах:

Карпов Денис Федорович, старший преподаватель; karpovdf@vogu35.ru ORCID: 0000-0002-3522-9302; Scopus Author ID: 57210325021; WoS Researcher ID: AAF-2092-2021

Павлов Михаил Васильевич, доцент, кандидат технических наук; pavlovmv@vogu35.ru ORCID : 0000-0002-8687-3296; Scopus Author ID: 57204361039; WoS Researcher ID: AAN-5773-2021

Гудков Александр Геннадьевич, доцент, кандидат технических наук; gudkovag@vogu35.ru ORCID ID: 0000-0002-4903-2906; Scopus Author ID: 57219407924; WoS Researcher ID: AAN-2611-2021

Information about authors:

Denis F. Karpov, Senior Lecturer, karpovdf@vogu35.ru ORCID: 0000-0002-3522-9302; Scopus Author ID: 57210325021; WoS Researcher ID: AAF-2092-2021

Mikhail V. Pavlov, Cand. Sci. (Eng); Assoc. Prof.; pavlovmv@vogu35.ru ORCID : 0000-0002-8687-3296; Scopus Author ID: 57204361039; WoS Researcher ID: AAN-5773-2021

Alexander G. Gudkov, Cand. Sci. (Eng); Assoc. Prof.; gudkovag@vogu35.ru ORCID ID: 0000-0002-4903-2906; Scopus Author ID: 57219407924; WoS Researcher ID: AAN-2611-2021

Конфликт интересов/ Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 24.12.2022.

Одобрена после/рецензирования Revised 20.01.2023.

Принята в печать/ Accepted for publication 20.01.2023.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 624.044

DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-1-185-193

Оригинальная статья / Original Paper

**Новые виды мембранно-стержневых и мембранно-пневматических сооружений
и усовершенствованные методы их расчета**

А.Ю. Ким, С.В. Полников, М.Ф. Амоян

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.,
410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования было создание новых быстровозводимых мембранно-стержневых сооружений и нелинейных методов их расчета. **Метод.** Применен шаговый метод с итерационной численной процедурой Эйлера-Коши третьего порядка точности с применением на шаге метода конечных элементов **Результат.** Разработана методика статического расчета мембранно-стержневых сооружений с учетом нелинейных факторов. Составлен алгоритм расчета и по нему написана программа расчета таких сооружений. На данную программу получено свидетельство на ЭВМ № 2017613415 «Программа расчета мембранно-пневматических сооружений с учетом нелинейных факторов итерационным методом приращения параметров». **Вывод.** Рекомендовано применять одношаговый расчёт мембранно-стержневых систем с пятью итерациями на шаге, либо многошаговый расчёт с пятью шагами при одной итерации на шаге. Эффективны также смешанные варианты.

Ключевые слова: итерационный метод Эйлера-Коши третьего порядка точности, метод расчета мембранно-стержневых систем, новые конструктивные формы большепролетных мембранно-стержневых сооружений, эффективность новых объектов

Для цитирования: А.Ю. Ким, С.В. Полников, М.Ф. Амоян. Новые виды мембранно-стержневых и мембранно-пневматических сооружений и усовершенствованные методы их расчета. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023; 50(1):185-193. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-1-185-193

**New types of membrane-rod and membrane-pneumatic structures
and improved methods for their calculation**

A.Yu. Kim, S.V. Polnikov, M.F. Amoyan

Yu.A. Gagarin Saratov State Technical University,
77 Politekhnicheskaya Str., Saratov 410054, Russia

Abstract. Objective. The purpose of this study was to create new pre-fabricated membrane-rod structures and non-linear methods for their calculation. **Method.** A stepwise method with an iterative numerical Euler-Cauchy procedure of the third order of accuracy was applied with the use of the finite element method at the step. **Result.** A technique for static calculation of membrane-rod structures has been developed, taking into account nonlinear factors. A calculation algorithm has been compiled and a program for calculating such structures has been written according to it. For this program, a certificate was obtained on the computer No. 2017613415 "Program for calculating membrane-pneumatic structures, taking into account non-linear factors by the iterative method of incrementing parameters." **Conclusion.** It is recommended to use a one-step calculation of membrane-rod systems with five iterations per step or a multi-step calculation with five steps with one iteration per step. Mixed options are also effective.

Keywords: iterative Euler-Cauchy method of the third order of accuracy, method for calculating membrane-rod systems, new structural forms of long-span membrane-rod structures, efficiency of new facilities

For citation: A.Yu. Kim, S.V. Polnikov, M.F. Amoyan. New types of membrane-rod and membrane-pneumatic structures and improved methods for their calculation. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2023; 50(1): 185-193. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-1-185-193

Введение. Впервые в нашей стране быстровозводимые сооружения из металлических конструкций появились благодаря инженеру Шухову В.Г. в Российской Империи в городе Нижнем Новгороде на Всероссийской промышленной и художественной выставке в 1896 году. За летние месяцы 1896 года были возведены три большепролетных сооружения, одна из них, ротонда диаметром 68 метров (рис. 1, 2).

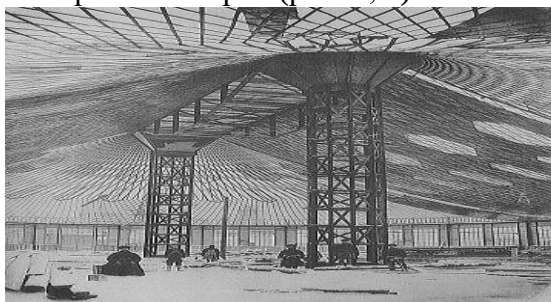


Рис. 1. Ротонда из металлических конструкций диаметром 68 метров
Fig. 1. Rotunda made of metal structures with a diameter of 68 meters

Для нашей страны это было впервые, когда такие сооружения из готовых деталей собрали на площадке за три месяца. Сейчас это бы назвали «отверточной сборкой», когда из конструкций заводского изготовления на строительной площадке собирают новое сооружение. Массовое строительство быстровозводимых сооружений из металлических конструкций началось в США в тридцатые годы двадцатого века. Первые такие сооружения были возведены в штате Аляска, а потом распространились и на другие штаты. И постепенно стали распространяться за пределы США в другие страны, в том числе и в СССР. В СССР первые быстровозводимые сооружения появились после начала Великой Отечественной Войны. В Иран в декабре 1941 года стали поступать товары по Ленд-лизу, для хранения которых понадобились сотни вместительных складов, поэтому рядом с портами на Каспийском море построили данные быстровозводимые сооружения.

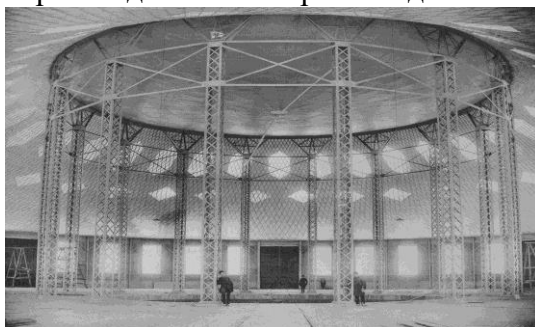


Рис. 2. Быстровозводимое сооружение Ротонды диаметром 68 метров
Fig. 2. Prefabricated structure Rotunda with a diameter of 68 meters

Для хранения бочек с ГСМ, грузовых автомобилей, авиационной техники, авиабомб американские строители возводили за пару недель из металлических конструкций ангары, которые собирали на строительной площадке из конструкций, которые привозили из США на кораблях (рис. 3). Начиная с 1943 года по 1945 годы в СССР было поставлено оборудование для пяти нефтеперерабатывающих заводов, в которое входило оборудование по возведению цехов из металлических конструкций. Данные конструкции привозились в СССР морским путем, а далее по железной дороге доставлялись до места возведения, и уже на месте советские строители собирали из данных конструкций цеха заводов. Такие нефтеперерабатывающие заводы были построены в Орске, Гурьеве, Куйбышеве и других городах СССР (рис. 4).



Рис. 3. Ангар из металлических конструкций для хранения самолетов (Иран)

Fig. 3. Hangar of metal structures for aircraft storage (Iran)

Так как у советских строителей не было опыта по возведению таких сооружений, да и объем работы был очень большой, поэтому и возводили такие сооружения около года, хотя в США нормативный срок строительства был в три раза ниже.

Следующим местом, где массово использовались быстровозводимые ангара из металлических конструкций, был маршрут Аляска-Сибирь (АЛСИБ). Через каждые две тысячи километров, там возводились аэродромы, на которых монтировались ангара из металлических конструкций. По данным отечественных исследователей, таких аэродромов было более десятка, и практически на всех них стояли быстровозводимые ангара из металлических конструкций, что создавало достаточно комфортную инфраструктуру авиабаз. [7, 8, 9]



Рис. 4. Цеха из металлических конструкций нефтеперерабатывающих заводов

Fig. 4. Shops from metal structures of oil refineries

В девяностые годы прошлого века в нашей стране стали появляться новые сложные большепролетные сооружения из металлических конструкций. Из наиболее значительных мембранно-стержневых сооружений отметим несколько, построенных в Адлере к Олимпиаде 2012 года в Сочи (рис. 5).



Рис. 5. Мембранно-стержневое покрытие стадиона Фишт в Сочи

Fig. 5. Membrane-rod coating of the Fisht stadium in Sochi

Постановка задачи. Целью данного исследования является создание новых быстровозводимых мембранно-стержневых сооружений и нелинейных методов их расчета. Учет нелинейных факторов позволяет сделать расчет более точным, тем самым уменьшить сечения элементов, из которых изготовлены конструкции сооружений и добиться значительной экономии, что существенно в условиях мирового экономического кризиса и санкций, введенных против нашей страны.

Авторами данной статьи было разработано и запатентовано новое мембранно-пневматическое сооружение, на которое получен патент РФ №2757438. Изобретение относится к наземному строительству, в частности к строительству большепролетных сооружений с мембранно-пневматическим покрытием и с пролетами от 60 до 150 метров (рис. 6,7). Мембранно-стержневые и мембранно-пневматические системы получили применение при строительстве облегченных покрытий сооружений больших пролетов, таких как складские помещения, прозрачные перекрытия теплиц и оранжерей, крытые бассейны,

теннисные корты, выставочные павильоны, крытые стоянки автотранспорта или летательных аппаратов, гаражи для строительной, сельскохозяйственной и военной техники. В мембранно-стержневых конструкциях усилия с верхней мембраны на нижнюю передаются с помощью стоек, а в мембранно-пневматических с помощью накачанного под давлением воздуха между гибких мембран, а по статической работе, данные сооружения очень похожи. Как показал опыт, применяемые в мире мембранно-стержневые и линзообразные мембранно-пневматические системы относятся к прогрессивным конструкциям. Это эффективные системы, дальнейшее совершенствование которых открывает большие возможности в строительстве легких сооружений больших пролетов.

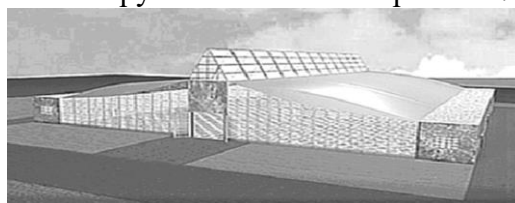


Рис. 6. Большепролетное мембранно-стержневое сооружение
Fig. 6. Long-span membrane-rod structure

При обычных нагрузках мягкая оболочка сооружения работает в воздухоопорном режиме. Но при падении избыточного давления воздуха во внутреннем помещении сооружения оболочку поддерживают арки, приваренные к фундаменту, представляющее собой замкнутую трубу большого диаметра. Избыточное давление воздуха под оболочкой падает, либо, когда прекращается подкачка воздуха под оболочку, либо во время открытия торца или дверей сооружения при въезде крупногабаритной техники. Несущая способность системы, достаточная для перекрытия небольшого и среднего пролета, может быть своевременно восстановлена и, если нужно, увеличена за счет повышения избыточного давления под оболочкой.

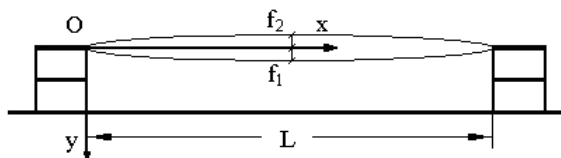


Рис. 7. Расчетная схема мембранно-стержневого сооружения
Fig. 7. Calculation scheme of the membrane-rod structure

Данное сооружение не нашло большого применения у нас в стране из-за высокой стоимости и больших эксплуатационных расходов. Так как в зимнее время требуется очень хорошее отопление, а в летнее время нужно охлаждение данного сооружения.

В последние десятилетия однопролетные линзообразные мембранно-пневматические системы широко применялись на военных базах США и с тех пор вызывают интерес у проектировщиков, специализирующихся на легких сооружениях больших пролетов. В таких сооружениях избыточное давление воздуха поддерживается только в замкнутых линзообразных полостях мембранно-пневматического покрытия, в то время как под покрытием, т.е. во внутреннем помещении сооружения, избыточное давление воздуха отсутствует. Необходимости в устройстве шлюзов в таком сооружении нет, что для МЧС и военных специалистов имеет большое значение. Технической задачей изобретения является уменьшение деформативности и повышение эксплуатационной надежности сооружения. Указанная задача достигается тем, что в сооружении 1 с мембранно-стержневым покрытием 2, прямоугольным в плане, содержащем расположенные над горизонтальным полом 3 внешнее опорное устройство 4, выполненное в виде боковых плоских стен 5 рамного типа, имеющих элементы оконного витража 6 и соединенных между собой торцевой стеной 7 сооружения, внутреннее опорное устройство 8, включающее один или два ряда вертикальных колонн 9, объединенных между собой многопролетным горизонтальным ригелем 10. Ригель, расположен вдоль сооружения, многопролетное предварительно напряженное мембранно-стержневое покрытие 2, состоящее из нескольких за-

мкнутых линзообразных полостей 11, образованных нижней 12 и верхней 13 мембранами, закрепленными при помощи анкерных устройств 14 к боковым плоским стенам внешнего опорного устройства 4 и расположенными над ригелем 10 каждого ряда вертикальных колонн 9 внутреннего опорного устройства 8. В данном сооружении нижняя 12 и верхняя 13 мембраны 2 покрытия соединены между собой по торцам каждой линзообразной полости 11 вертикальной пластиной 15, выполненной в виде набора плоских мембранно-стержневых панелей 16, а каждая мембрана 12, 13 выполнена в виде гибкой оболочки постоянной кривизны. Все эти позиции можно видеть на рис. 8-10.

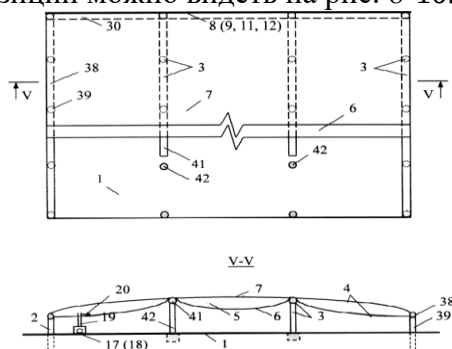


Рис. 8. План и разрез мембранно-стержневого сооружения I-I
Fig. 8. Plan and section of the membrane-rod structure I-I

Постоянство мембраны обусловлено равномерностью сил предварительного напряжения мембран избыточным давлением воздуха, для уменьшения деформативности здания, внешнее опорное устройство выполнено в виде двух боковых зданий, каждое из которых включает две плоские стены 17, верхнюю плиту покрытия 18 и плиты межэтажного перекрытия 19, при этом нижняя и верхняя мембраны покрытия над ригелем каждого ряда вертикальных колонн герметично скреплены между собой по всей длине ригеля 20, обеспечивая автономную герметичность и независимую работу при силовых нагрузках каждой линзообразной полости мембранно-пневматического покрытия 21, внутри сооружения стены боковых зданий на уровне верхнего этажа соединены между собой горизонтальными стержнями, объединенными с отдельными вертикальными колоннами внутреннего опорного устройства и расположенными поперек сооружения ниже мембранно-пневматического покрытия 22, внутреннее помещение сооружения, расположенное между покрытием и полом сооружения 23, имеет избыточное давление воздуха, поддерживаемое воздуходувной машиной 24, согласно изобретению, внешнее опорное устройство выполнено в виде двух продольных боковых многоэтажных зданий, каждое из которых включает две плоские стены, верхнюю плиту покрытия и нижние плиты межэтажного перекрытия, нижняя и верхняя мембраны покрытия сооружения над ригелем каждого ряда вертикальных колонн герметично скреплены между собой по всей длине ригеля, обеспечивая автономную герметичность и независимую работу под силовыми нагрузками каждой линзообразной полости мембранно-пневматического покрытия, а внутри сооружения стены продольных боковых зданий на уровне верхнего этажа зданий соединены между собой несколькими горизонтальными стержнями, объединенными с отдельными вертикальными колоннами и расположенными поперек сооружения ниже мембранно-пневматического покрытия.

Из проектов сооружений следует, что стоимость линзообразных мембранно-стержневых покрытий сооружений больших пролетов, примерно равна стоимости анкерных конструкций, т.е. в данном случае стоимости продольных боковых многоэтажных зданий, а также их колонн, забитых своей нижней частью в грунт.

К примеру, в однопролетном сооружении при снеговой нагрузке, составляющей сто килограмм на один квадратный метр покрытия общей площадью в один гектар, суммарный распор покрытия составляет около десяти тонн на один погонный метр длины сооружения. Общий же поперечный распор при длине сооружения в сто метров составляет

тысячу тонн. Распоры в сооружении особенно большие при пролетах, равных 150 метрам. Мембранно-стержневое покрытие идеально работает на растяжение и является наиболее легкой и в то же время достаточно жесткой конструкцией даже при больших пролетах. А мощные анкерные конструкции - это цена за эту легкость покрытия и большую величину перекрываемых пролетов. Возможность перекрывать большие пролеты - неоспоримое это достоинство мембранно-пневматических систем. Но конструкция при этом должна быть достаточно жесткой и надежной в эксплуатационном отношении.

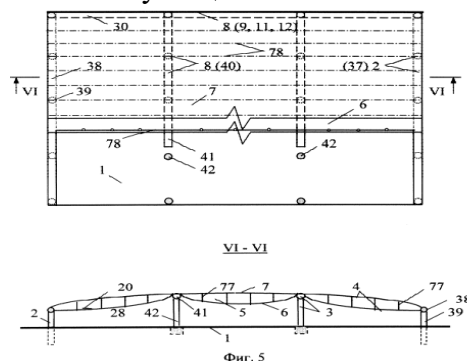


Рис. 9. План и разрез мембранно-стержневого сооружения II-II
Fig. 9. Plan and section of the membrane-rod structure II-II

Для военных специалистов важна живучесть конструкции, т.е. надежность конструкции при ее частичном разрушении. Такими конструкциями и являются данные сооружения. Им не страшны дыры от пуль, так как постоянная подкачка воздуха происходит всегда и в том количестве, в котором это необходимо.

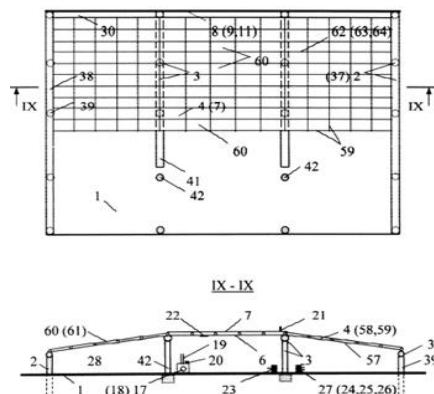


Рис.10. План и разрез мембранно-стержневого сооружения III-III
Fig.10. Plan and section of the membrane-rod structure III-III

Методы исследования. Для расчета таких сооружений авторами статьи разработана методика статического расчета мембранно-стержневых сооружений с учетом нелинейных факторов. Составлен алгоритм расчета и по нему написана программа расчета таких сооружений. На данную программу получено свидетельство на ЭВМ № 2017613415 «Программа расчета мембранно-пневматических сооружений с учетом нелинейных факторов итерационным методом приращения параметров», по которой и произведено численное исследование таких достаточно сложных сооружений.

Для расчета нами применен шаговый метод с итерационной численной процедурой Эйлера-Коши третьего порядка точности с применением на шаге метода конечных элементов. Для данного расчета авторами статьи применен один шаг и достаточно большое количество итераций, но если возникнет такая необходимость, например, для решения задач динамики, то можно применять и многошаговый метод [1-4, 13]. Множество итераций нами было применено для определения величин геометрической и конструктивной нелинейности данного сооружения.

Обсуждение результатов. После проведенного численного исследования мембранно-стержневых сооружений различного пролета с помощью программных комплексов нами сделаны следующие выводы по конструктивным схемам сооружений такого вида.

Пролет 36 м - требуются продольные боковые многоэтажные здания с фундаментом на естественном основании.

Пролет 72 м - требуются боковые многоэтажные здания, рамные колонны которых в виде железобетонных свай заглублены в грунт на глубину в 15 метров.

Пролет 100 м - требуются боковые многоэтажные здания, рамные колонны которых в виде металлических свай заглублены в грунт на глубину в 15 метров и при этом концы свай снабжены винтами диаметром, равным два метра.

Пролет 120 м - требуются боковые многоэтажные здания, рамные колонны которых в виде металлических свай заглублены в грунт на глубину в 15 метров. При этом концы свай снабжены винтами диаметром в три метра. Винтовые сваи работают на выдергивание с большей силой. Используется высокая эффективность свайных ростверков при работе на изгиб и выдергивание.

Пролет 150 м - требуются боковые многоэтажные здания, рамные колонны которых в виде металлических свай заглублены в грунт на глубину, равную 15 метрам.

Концы свай снабжены винтами двухметрового диаметра, а стены продольных боковых многоэтажных зданий соединены горизонтальным стержнем, выполняющим роль распорки, препятствующей наклону боковых зданий вовнутрь сооружения под действием распора от растянутых мембран покрытия. Поперечный стержень целесообразно выполнять трубчатого поперечного сечения для повышения его устойчивости. Благодаря монолитному объединению поперечного горизонтального стержня с вертикальными колоннами внутреннего распорного устройства, устойчивость стержня определяется в многопролетном сооружении длиной только одного пролета.

При пролетах 120-150 метров повышение надежности работы сооружения достигается за счет возникающего при избыточном давлении воздуха во внутреннем помещении воздушного подпора, действующего на покрытие и стены боковых зданий сооружения. Воздушный подпор воспринимает значительную часть снеговой и ветровой нагрузки и уменьшает значительную часть распора, воспринимаемого анкерными конструкциями. Такая конструкция дает возможность пропускать в открытые ворота большегрузный транспорт. Если во время действия ураганов закрыть шлюзы и повысить избыточное давление во внутреннем помещении сооружения до расчетной величины, то, гарантируется сохранность сооружения при сильных ураганах (но не при тайфунах, когда требуются тяжелые здания). Другими словами, стены сооружения воспринимаются как распоры от мембран, так и давление ветра с внешней стороны сооружения. С внутренней же стороны сооружения действует избыточное давление воздуха в замкнутой полости внутреннего помещения сооружения. Это суммарное давление уравновешивает ветер, способствуя улучшению напряженно-деформированного состояния элементов внешних опорных конструкций в период эксплуатации сооружения. Избыточное давление воздуха, действующее изнутри сооружения по величине примерно того же порядка, что и наружное давление. После проведенного численного исследования установлены величины геометрической и физической нелинейности и несущая способность сооружений такого вида.

Вывод. После проведенного численного исследования можно сделать следующие выводы. Такие конструкции предназначены быть большепролетными и ими можно перекрывать пролет сооружения от 36 до 150 метров. Если пролет превышает сто и более метров, то боковые здания, на которые крепится конструкция перекрытия, должны иметь металлические сваи, заглубленные в грунт на пятнадцать метров. Концы свай снабжены винтами диаметром в три метра. Винтовые сваи работают на выдергивание с большей силой. Используется высокая эффективность свайных ростверков при работе на изгиб и выдергивание. Про величину геометрической нелинейности в таких сооружениях можно сделать стандартный вывод, чем больше величина пролета и нагрузка, тем больше нелинейность.

Влияние геометрической нелинейности на прогибы мембранно-стержневых систем не превышает 3-5 %, а на усилия 12-15%.

Метод конечных элементов в сочетании с шаговыми методами в настоящее время является лучшим методом для расчета нелинейных сооружений [10, 11, 14 - 18]. Для исследований рекомендовано применять одношаговый расчёт мембранно-стержневых систем с пятью итерациями на шаге, либо многошаговый расчёт с пятью шагами при одной итерации на шаге. Эффективны также смешанные варианты.

Результаты расчета на прочность, жесткость и устойчивость линзообразных мембранно-стержневых систем покрытий пролетом 150 метров выполнены с учетом требований действующих строительных норм при подборе толщин несущей и напрягающей мембран линзы. При этом выполнена проверка покрытия на максимально допустимый прогиб системы для определения максимальной несущей способности покрытия. Район строительства – третья климатическая зона, расчетная и нормативная снеговая нагрузка 140 кг и 100 кг на один квадратный метр горизонтальной поверхности [5, 6, 12]. При пролете системы, равном 150 метров, толщины стальных мембран приняты равными 10 мм для несущей мембраны и 8 мм для напрягающей мембраны. Избыточное давление в линзе принято равным 5000 Па. Вес обеих мембран на один квадратный метр стального покрытия составляет 144 кг (80 кг и 64 кг), что экономически эффективно.

Библиографический список:

1. Городецкий, А.С. Метод конечных элементов в проектировании транспортных сооружений. / А.С. Городецкий и др. – М.: Транспорт, 1981.– 143 с.
2. Давиденко Д. Ф. О приложении метода вариации параметра к теории нелинейных функциональных уравнений. / Д.Ф. Давиденко // Укр. матем. журнал, 1955. т. 7. – Киев, с. 56–64.
3. Давиденко Д.Ф. О применении метода вариации параметра к построению итерационных формул повышенной точности для определения численных решений нелинейных интегральных уравнений. Докл. АН СССР, т. 162.– М., 1965, с. 78–85.
4. Игнатьев А.В. Основные формулировки метода конечных элементов в задачах строительной механики. Часть 3 // Вестник МГСУ 2015. № 1. С. 16–26.
5. Ким А.Ю. Расчет мембранно-пневматических систем с учетом нелинейных факторов. Монография. Континуальные расчетные схемы / А.Ю.Ким. Саратов. гос. аграр. ун-т.- Саратов, 2000. - 198 с.- Деп. в ВИНТИ 24.04.00. - № 1148 - В2000.
6. Ким А.Ю. Многопролетные мембранно-стержневые покрытия сооружений/ А.Ю. Ким // Вестник СГАУ. - 2003.- № 2. - С. 72-74.
7. Ким А.Ю., Амоян М.Ф., Хапилин В.Е. Численное исследование влияния отдельных стоек в линзах на работу нелинейных линзообразных мембранно-пневматических систем шаговым методом. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022;49(1):122-132. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2022-49-1-122-132>
8. Ким А.Ю., Амоян М.Ф., Хапилин В.Е. Численное исследование влияния отдельных стоек в линзах на работу нелинейных линзообразных мембранно-пневматических систем шаговым методом. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022;49(1):122-132. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2022-49-1-122-132>
9. Металлические конструкции, под ред. Ю.И. Кудишина, Москва, Академия, 2008 г.-688 с.
10. Петров, В.В. Метод последовательных нагружений в нелинейной теории пластинок и оболочек. В.В. Петров – Саратов: Изд-во СГУ, 1975.– 118 с.
11. Петров В.В. Нелинейная инкрементальная строительная механика. М.: Инфра-Инженерия, 2014. – С. 480.
12. СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия».
13. Стренг Г., Фикс Д. Теория метода конечных элементов. / Г. Стренг, Д.М. Фикс: Мир, 1977. – 349 с.
14. Трофимов В.И., Еремеев П.Г. «Мембранные конструкции зданий и сооружений» – Москва, Стройиздат, 1990.-447 с.
15. Belostosky A.M. Adaptive Finite Element Models Coupled with Structural Health Monitoring Systems for Unique Buildings /A.M. Belostosky, P.A. Akimov // Procedia Engineering. – 2016. – Vol. 153. – P. 83–88.
16. Travush V.I. Contemporary Digital Technologies in Construction Part 1: About Mathematical (Numerical) Modelling / V.I. Travush, A.M. Belostosky, P.A. Akimov. – DOI 10.1088/1757-899X/456/1/012029 // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – T 456.
17. Schulz M., Pellegrino S. Equilibrium paths of mechanical systems with unilateral constraints. Part I. Theory // Pro-ceeding of the Royal Society. Ser. A. 2000. Vol. 456. No 8. Pp. 2223–2242.

References:

1. Gorodetsky, A.S. Finite element method in the design of transport facilities. A.S. Gorodetsky and others . M.: Transport, 1981; 143 [In Russ]
2. D. F. Davidenko. On the application of the parameter variation method to the theory of nonlinear functional equations. *Ukr. math. magazine*, 1955; 7: 56–64.
3. Davidenko D.F. On the application of the parameter variation method to the construction of iterative formulas of increased accuracy for determining the numerical solutions of nonlinear integral equations. *Report USSR Academy of Sciences*, M., 1965; 162.:78–85 [In Russ]
4. Ignatiev A.V. Basic formulations of the finite element method in problems of structural mechanics. Part 3. *Vestnik MGSU* 2015;1: 16-26. [In Russ]
5. Kim A.Yu. Calculation of membrane-pneumatic systems taking into account non-linear factors. Monograph. Continuum design schemes. *Sarat. state agrarian un-t.* - Saratov, 2000; 1148: 198 - Dep. at VINI-TI 24.04.00. - No. 1148 - B2000. [In Russ]
6. Kim A.Yu. Multi-span membrane-rod coatings of structures. *Vestnik SSAU*. 2003; 2: 72-74. [In Russ]
7. Kim A.Yu., Amoyan M.F., Khapilin V.E. Numerical study of the influence of individual racks in lenses on the operation of nonlinear lenticular membrane-pneumatic systems by the step method. *Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science*. 2022;49(1):122-132. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2022-49-1-122-132> [In Russ]
8. Kim A.Yu., Amoyan M.F., Khapilin V.E. Numerical study of the influence of individual racks in lenses on the operation of nonlinear lenticular membrane-pneumatic systems by the step method. *Herald of the Daghestan State Technical University. Technical science*. 2022;49(1):122-132. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2022-49-1-122-132>[In Russ]
9. Metal structures, ed. Yu.I. Kudishina, Moscow, Academy, 2008; 688. [In Russ]
10. Petrov V.V. Method of successive loadings in the nonlinear theory of plates and shells. *Saratov: Publishing House of SGU*, 1975;118[In Russ]
11. Petrov V.V. Nonlinear incremental structural mechanics. M.: *Infra-Engineering*, 2014; 480. [In Russ]
12. SP 20.13330.2016 "Loads and impacts"[In Russ]
13. Streng G., Fix D. Theory of finite element method. / G. Streng, D.M. Fix: Mir, 1977; 349.
14. Trofimov V.I., Ereemeev P.G. "Membrane structures of buildings and structures" Moscow, *Stroyizdat*, 1990; 447. [In Russ]
15. Belostosky, A.M. Adaptive Finite Element Models Coupled with Structural Health Monitoring Systems for Unique Buildings /A.M. Belostosky, P.A. Akimov. *Procedia Engineering*. 2016; 153: 83–88.
16. Travush V.I. Contemporary Digital Technologies in Construction Part 1: About Mathematical (Numerical) Modeling / V.I. Travush, A.M. Belostosky, P.A. Akimov. – DOI 10.1088/1757-899X/456/1/012029 // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018; 456.
17. Schulz M., Pellegrino S. Equilibrium paths of mechanical systems with unilateral constraints. Part I. Theory. *Proceeding of the Royal Society. Ser. A*. 2000; 456:(8): 2223–2242.

Сведения об авторах:

Ким Алексей Юрьевич, доктор технических наук, профессор, кафедра строительных материалов, конструкций и технологий; sberbanksp@yandex.ru

Полников Сергей Валерьевич, аспирант, кафедра строительных материалов, конструкций и технологий; Werad91@mail.ru orcid: 0000-0002-4670-309X

Миша Фрикович Амоян, аспирант, кафедра строительных материалов, конструкций и технологий; ezid-007@ya.ru

Information about authors:

Aleksey Yu.Kim, Dr.Sci. (Eng), Prof., Department of Building Materials, Structures and Technologies; sberbanksp@yandex.ru

Sergey V. Polnikov, Postgraduate Student, Department of Building Materials, Structures and Technologies; Werad91@mail.ru orcid: 0000-0002-4670-309X

Misha F. Amoyan, Postgraduate Student, Department of Building Materials, Structures and Technologies; ezid-007@ya.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/ Received 14.12.2022

Одобрена после рецензирования / Reviced 12.01.2023.

Принята в печать/ Accepted for publication 12.01.2023.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 691.16

DOI: 10.21822/2073-6185-2023-50-1-194-206

Оригинальная статья /Original Paper

Наполненные битумные композиции в строительной индустрии

О.Н. Киндеев, М.А. Высоцкая, А.В. Курлыкина

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова,
308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46, Россия

Резюме. Цель. Свойства дорожного битума при взаимодействии с компонентами строительных композиций всегда трансформируются относительно своих оригинальных свойств. При работе с материалами, в основе которых лежат наполненные битумные композиции, не зависимо от области их применения, основной задачей является мониторинг динамики изменения характеристик и регулирование в требуемом направлении, а также сохранение таких свойств, как вязкость, гибкость и текучесть. Цель работы заключается в исследовании влияния модифицирующих добавок различной основы (наполнители, пластификаторы и воски) на свойства битумного вяжущего и оценки эффективности их вклада в формирование наполненных битумных композиций для строительной отрасли. **Метод.** Методологической основой работы является принцип структурообразования битумов. Экспериментальные исследования выполнялись с использованием стандартных и специальных методов. **Результат.** Как наполнитель в битумной композиции наилучшим образом себя зарекомендовала фибра стекловолоконная. Наиболее ярко выраженный положительный пластифицирующий эффект наблюдается от использования экстракта селективной очистки масел, который позволяет в широком диапазоне управлять гибкостью системы. Установлено, что пластификатор полиалкилбензол эффективно регулирует свойства композиции при отрицательных температурах, незначительно влияя на теплостойкость; синтетический воск Titan и полиэтиленовый воск Viscobit равномерно распределяются в объеме битумного вяжущего и обеспечивают стабилизацию свойств системы. **Вывод.** Изучены 3 группы добавок-наполнителей битумной матрицы. Установлено, что направленное регулирование свойств битумных систем возможно за счет рационального выбора типа добавки-наполнителя. Используя комплексные наполнения битумной матрицы при проектировании битумных композиций с возможностью регулирования и нормирования их свойств (показателей оптимизации) возможно получение экономических и эксплуатационных эффектов.

Ключевые слова: наполненные битумные композиции; модифицирующие добавки для битума, теплостойкость, гибкость

Для цитирования: О.Н. Киндеев, М.А. Высоцкая, А.В. Курлыкина. Наполненные битумные композиции в строительной индустрии. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023; 50(1):194-206. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-1-194-206.

Filled bituminous compositions in the construction industry

O.N. Kindeev, M.A. Vysotskaya, A.V. Kurlykina

V.G. Shukhov Belgorod State Technological University,
46 Kostyukova St., Belgorod 308012, Russia

Abstract. Objective. The properties of road bitumen, when interacting with the components of building compositions, are always transformed relative to their original properties. Therefore, when working with materials based on filled bitumen compositions, regardless of their field of application, the main task is to monitor the dynamics of changes in characteristics and control in the required direction, as well as maintaining properties such as viscosity, flexibil-

ity and fluidity. The purpose of the work is to study the effect of modifying additives of various bases (fillers, plasticizers and waxes) on the properties of a bituminous binder and to evaluate the effectiveness of their contribution to the formation of filled bitumen compositions for the construction industry. **Method.** The methodological basis of the work is the principle of bitumen structure formation. Experimental studies were carried out using standard and special methods. **Result.** The results obtained showed that fiberglass fiber proved to be the best filler in the bitumen composition. In the study of plasticizers, it was revealed that the most pronounced positive plasticizing effect is observed from the use of an extract of selective oil purification, which allows you to control the flexibility of the system in a wide range. It has been established that the plasticizer polyalkylbenzene effectively regulates the properties of the composition at negative temperatures, slightly affecting the heat resistance. The results of the wax study show that Titan synthetic wax and Viscobit polyethylene wax are evenly distributed in the volume of the bituminous binder and provide stabilization of the system properties. **Conclusion.** In the process of performing the study, as well as analyzing the results obtained, 3 groups of bituminous matrix filler additives were studied. It has been established that the directed regulation of the properties of bitumen systems is possible due to the rational choice of the type of additive-filler. Thus, using complex fillings of the bitumen matrix when designing bitumen compositions with the possibility of regulating and normalizing their properties (optimization indicators), it is possible to obtain economic and operational effects.

Keywords: filled bituminous compositions; modifying additives for bitumen, resistance to effects of heat, limberness

For citation: O.H. Kindeev, M.A. Vysotskaya, A.V. Kurlykina. Filled bituminous compositions in the construction industry. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2023; 50(1): 194-206. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-1-194-206.

Введение. Битум в чистом виде или как композиция, наполненная дисперсным минеральным наполнителем (киры, асфальтиты, мальты и т.д.), в виду комплекса полезных свойств, широко использовался еще на заре становления человечества в разнообразных сферах жизни: при изготовлении посуды, изоляции деревянных элементов в строительстве, как связующий компонент при выполнении мозаик и т.д.

Развитие техносферы повысило значимость битума и его производных в жизни социума сегодня. Битум широко используется в дорожном и гражданском строительстве при производстве кровельных материалов и гидроизоляций; как электроизоляция в электро-технической промышленности; в отделке деревянных, кожаных и бумажных изделий, в изготовлении аккумуляторных мастик, изготовлении кабельной и лакокрасочной продукции, в прецизионном литье. Обширность сфер использования и специфика свойств битума (высокая термочувствительность, склонность к старению и т.д.) определили необходимость использования приемов его модифицирования [1-7] или наполнения [8-10].

В виду особенностей рецептурного состава изделий, битум практически всегда утрачивает свои оригинальные свойства, вступая во взаимодействие с другими компонентами. Так, например, в составе асфальтобетонных смесей битум, вступая во взаимодействие с дисперсной составляющей смеси – минеральным порошком, образует асфальтовязущее вещество (АВВ), которое кардинально отличается от битума и выполняет роль связующего компонента в асфальтобетоне. В случае использования битума в основных композиционных материалах (рубероид, толь, рулонная кровля, битумная черепица, битумно-полимерная стыковочная лента) для придания изделию необходимых эксплуатационных параметров битум армируют и модифицируют широкой линейкой добавок и наполнителей. Раскрытие потенциала битумных вяжущих как гидроизоляционных композиций: мастик, герметиков, и придание им необходимой технологичности возможно только при использовании приемов модифицирования полимерными и наполнении минеральными компонентами битумной матрицы, а также ее пластифицировании специальными пластификаторами. Таким образом, в битуме, выполняющем роль ключевого связую-

щего компонента практически в любой композиции на битумной основе, при первом же контакте с рецептурными компонентами композиции наблюдается трансформация его уникальных свойств, заложенных на стадии проектирования.

Так, например, результаты, полученные коллективом авторов [11] демонстрируют, что при наполнении битума золами уноса Назаровской ГРЭС и Омской ТЭЦ обе золы способствуют сильному возрастанию вязкости битума высококальциевая в 1,5–3,5 раза, низкокальциевая – в 2,5–8,5(!) раз. При этом во всем температурном диапазоне испытаний значение комплексного модуля G в 1,5–2,5 раза больше у мастики на ЗУ Омской ТЭЦ, чем у битумного композита на ЗУ Назаровской ГРЭС. Иллюстрацией вариации значимого изменения свойств строительных битумов посредством введения наполнителей (отходов керамзита, древесной пыли, отходов производства ЦСП, углеродного наноматериала «Таунит») является работа Ярцева В.П. с коллегами [12], в результате которой была выявлена возможность повышения долговечности и теплостойкости строительных битумов. В случае же рассмотрения классического состава щебеночно-мастичного асфальтобетона (ЩМА) [13] наблюдается комплексное воздействие на битумную матрицу минерального порошка, содержание которого в композите может достигать 15 % и стабилизирующей добавки.

В настоящий момент нормативной литературой не учитывается и не регламентируется динамика изменения свойств битума при взаимодействии с минеральными материалами при формировании структуры композитов на его основе. Однако, на происходящие структурные изменения в системе битумо-минеральных смесей (БМС) указывают ряд исследователей [14–20], отмечая, что в наполненных битумных системах равновесное состояние смещается относительно базового битума, а в процессе структурирования посредством избирательной адсорбции компонентов битума в минеральный наполнитель наблюдается нарастание жесткости, а в ряде случаев и хрупкости системы.

Очевидно, что при работе с материалами, в основе которых лежат наполненные битумные композиции не зависимо от области их применения, основной задачей является расширение интервала пластичности системы за счет одновременного улучшения ее высоко и низкотемпературных свойств, при соблюдении технологических ограничений, таких как вязкость и текучесть.

Постановка задачи. В соответствии с вышеизложенным, целью исследования является анализ влияния различных по своей природе добавок на характеристики битума и оценка эффективности их вклада в формирование наполненных битумных композиций для строительной отрасли. Для этого к решению был намечен ряд задач: анализ литературы по тематике исследования для выявления наиболее значимых свойств параметров в БМС и видов наполнителей; выбор оптимизируемых параметров в зависимости от конкретной задачи (гибкость и теплостойкость БМС); исследование влияния концентрации наполнителей в битумной матрице на выбранный оптимизируемый параметр.

Методы исследования. Методологической основой работы является принцип структурообразования битумов. Экспериментальные исследования выполнялись с использованием стандартных и специальных методов: тестирование битумного образца на соответствие ГОСТ 33133, оценка удельной поверхности и гранулометрический состав наполнителей выполнялись при помощи ПСХ анализа и метода лазерной гранулометрии.

Также выполнялись исследования по оценке вяжущего и наполненных систем на гибкость на брус, стекание, для серии наполненных образцов определялась температура размягчения. Метод определения гибкости на брус традиционно применяется для оценки низкотемпературных свойств гидроизоляционных мастик и рулонных кровельных материалов, содержащих в своем составе значительное количество наполнителей. Гибкость БМС предлагается определять методом изгиба на брус диаметром 50 мм по ГОСТ 26589.

На наш взгляд, показатель «гибкость», характеризует устойчивость проектируемых композитов к разрушению при отрицательных температурах при воздействии изгибающих напряжений и напрямую связан с температурой наиболее холодной пятидневки региона

применения. Косвенно данный показатель может являться параметром оптимизации системы, позволяющий прогнозировать и исключить такой вид дефектов, как низкотемпературное растрескивание. Стеkanie наиболее точно и наглядно отражает поведение материала при высоких температурах.

Суть методики состоит в определении величины стекания образца вяжущего или БМС с наклонной плоскости при температуре 45°C. Обработка и анализ результатов экспериментальных исследований выполнялись на основе методов математической статистики. Построение графиков выполнялось в программе SigmaPlot.

Обсуждения результатов. В работе для приготовления наполненных битумных композиций использовался битум нефтяной дорожный БНД 70/100 «Московского» НПЗ, данные представлены в табл. 1; пластификаторы: масло индустриальное марки И-40, гудрон марки СБ 20/40, экстракт селективной очистки масел (ЭСО), полиалкилбензол (ПАБ); наполнители: микрокальцит, порошок резиновый, фибра полиамидная, фибра стекловолокнистая, целлюлозное волокно; синтетические воски (цереины): полиэтиленовый воск Viskobit, Titan амидный воск Licomont BS, алифатические углеводороды по типу синтеза Фишера-Тропша Sasobit.

Таблица 1. Показатели свойств БНД 70/100
Table 1. Properties indicators BND 70/100

Наименование показателя Name of indicator	Требование по ГОСТ 33133-2014 Requirement	Фактические значения Actual values
Основные показатели Basic indicators		
Глубина проникания иглы при 25°C 0,1, мм Depth of needle penetration	71-100	83
Температура размягчения по кольцу и шару, °C Softening temperature for ring and ball	не ниже 47	49
Растяжимость при 0°C, см Extensibility	не менее 3,7	3,6
Температура хрупкости, °C Brittleness temperature	не выше -18	-25
Изменение массы образца после старения, % Sample weight change after aging	не более 0,6	-0,15
Изменение температуры размягчения после старения, °C Change in softening point after aging	не более 7	6,4
Температура вспышки, °C Flash point	не ниже 230	295
Дополнительные показатели Additional indicators		
Динамическая вязкость, условие 1, Па*с Dynamic viscosity, condition	для набора статистических данных for a set of statistics	195,0
Изменение динамической вязкости, условие 2, % Change in dynamic viscosity		4,1
Динамическая вязкость, после старения, условие 1, Па*с Dynamic viscosity, after aging, condition 1,		458,5
Изменение динамической вязкости после старения после сдвигового воздействия, Условие 2, % Change in dynamic viscosity after aging after shear exposure		30,8
Растяжимость при 25 °C, см Extensibility	не менее 62	120
Глубина проникания иглы при 0 °C, 0,1 мм Depth of needle penetration	не менее 21	26
Температура хрупкости после старения, °C Brittleness temperature after aging	не выше -15	-22
Индекс пенетрации Penetration index	-1,0 ... +1,0	-0,2

Показатели свойств сырьевых компонентов представлены в табл. 2-4.

Таблица 2. Свойства наполнителей
Table 2. Filler properties

Наполнитель Filler	Размер частиц, мкм	Размер нити	
		диаметр, мкм	длина, мм
микрокальцит microcalcite	34 max 120	-	-
порошок резиновый rubber powder	400	-	-
фибра полиамидная polyamide fiber	-	12	6,4
фибра стекловолоконная glass fiber	-	13	4,2
целлюлозное волокно cellulose fiber	-	15	2,7

Таблица 3. Характеристики пластификаторов
Table 3. Characteristics of plasticizers

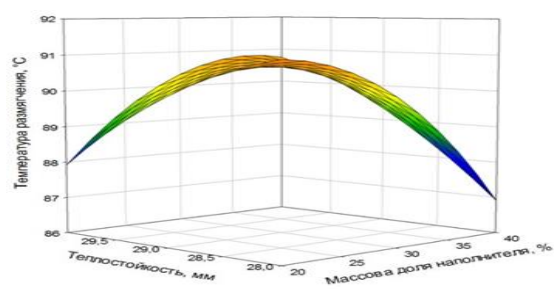
Наименование пластификатора Name plasticizer	Вязкость кинематическая при 100 °С мм ² /с Viscosity kinematic	Температура вспышки, в открытом тигле, С ⁰ Flash point, open cup	Условная вязкость, мм ² /с Nominal viscosity	Плотность при 20 °С, кг/м ³ Density
масло промышленное марки И-40 industrial oil brand	4,8	235	3,9	888,8
экстракт селективной очистки масел (ЭСО) selective oil extract	13,53	225	3,8	978,1
полиалкилбензол (ПАБ) polyalkylbenzene	12,7	147	2,7	925
гудрон марки СБ 20/40 tar brand	31,6	241	4,4	-

Приготовление лабораторных образцов наполненных битумных композиций выполнялось посредством лабораторной мешалки при температуре 150 °С. Перемешивание волокнистых наполнителей осуществлялось вручную.

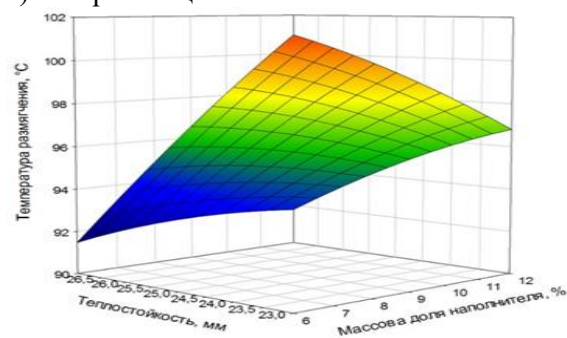
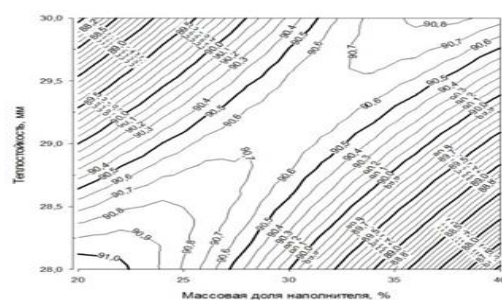
В процессе изучения битумных композиций с наполнителем из микрокальцита, резинового порошка, различной фибры и целлюлозного волокна было установлено, что ввиду их высокой структурирующей способности, данная группа склонна оказывать весьма негативное влияние на гибкость системы. Однако, формирование жестких связей в структуре композиций обуславливает их высокую теплостойкость. Анализ данных, полученных в процессе постановки эксперимента и наблюдения приготовленных систем засвидетельствовал, что данную группу наполнителей целесообразно тестировать на теплостойкость и температуру размягчения.

Для каждого наполнителя в виду особенностей геометрической формы его частиц, дисперсности и стоимости был определен интервал наполнения битумной матрицы. Так, содержание микрокальцита в композиции колебалось от 20 до 40%, резинового порошка – 6-12%, полиамидной фибры и целлюлозного волокна – 4-8%, стекловолоконной фибры 1-2%. Динамика изменения показателей свойств наполненных композиций от степени наполнения представлена на рис.1.

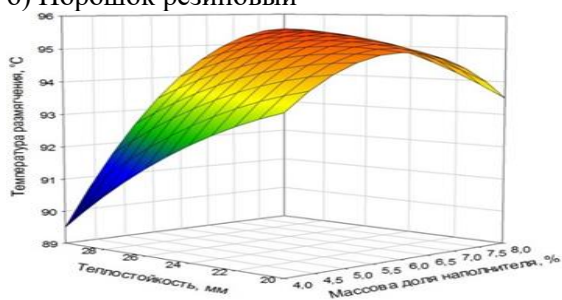
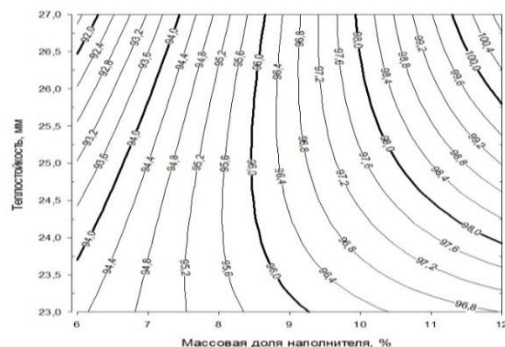
Иллюстрационный материал демонстрирует, что совокупность максимальных показателей (теплостойкости и температуры размягчения) достигается при наполнении битумной матрицы микрокальцитом в количестве 30%; полиамидной фиброй и микроцеллюлозой при введении 7,5%; резинового порошка необходимо 12%, минимальное содержание наполнителя в системе необходимо при использовании стекловолоконной фибры. Однако целью работы является не только выявление концентрационных пределов компонентов, изменяющих рассматриваемые показатели свойств, но и сами получаемые величины. Для удобства анализа полученных данных, обратимся к табл. 4.



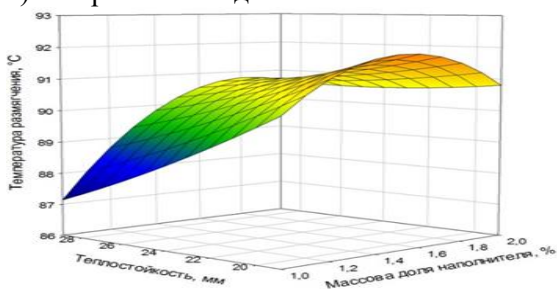
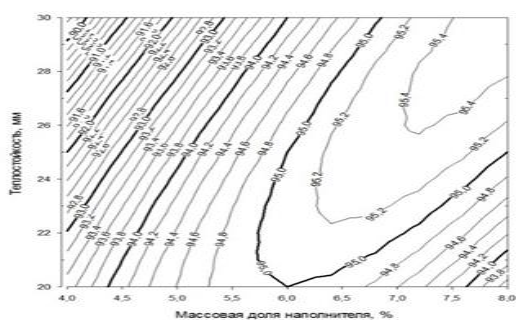
а) Микрокальцит



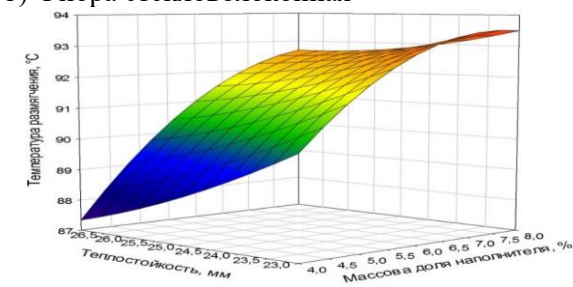
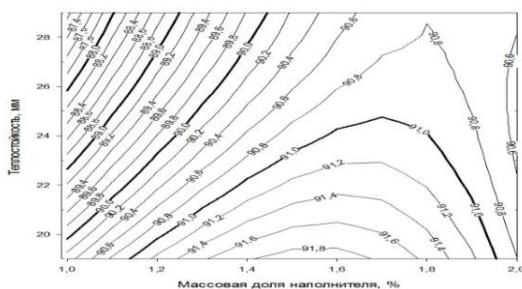
б) Порошок резиновый



в) Фибра полиамидная



г) Фибра стекловолоконная



д) Целлюлозное волокно

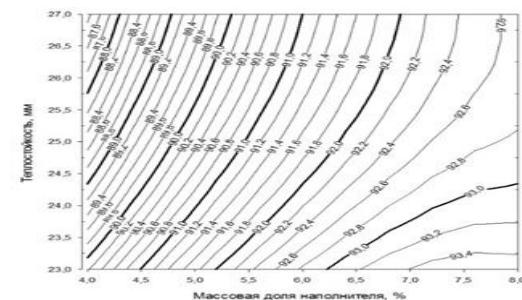


Рис. 1. Свойства битумной композиции с наполнителями
Fig. 1. Properties of bituminous composition with fillers

Таблица 4. Влияние вида наполнителя на концентрационные пределы его содержания в композиции для достижение совокупности максимальных показателей (теплостойкости и температуры размягчения)

Table 4. Influence of the type of filler on the concentration limits of its content in the composition to achieve a set of maximum indicators (heat resistance and softening point)

Вид наполнителя Type of filler	Содержание наполнителя в композиции, % The content of the filler in the composition	Показатели оптимизации Optimization metrics	
		температура размягчения, °C softening temperature	теплостойкость, мм heat resistance
микрокальцит microcalcite	30	90,7	29,5
порошок резиновый rubber powder	12	100,4	27,0
фибра полиамидная polyamide fiber	7,5	95,4	28
фибра стекловолоконная glass fiber fiber	1,5	91,8	28
целлюлозное волокно cellulose fiber	7,5	93,4	23,3

Анализ первой группы наполнителей свидетельствует, что, учитывая концентрационные пределы их содержания и достигаемые результаты показателей свойств, наиболее ярко выраженный положительный эффект наблюдается от использования фибры стекловолоконной.

С учетом накопленной экспериментальной базы также можно отметить, что волокнистый наполнитель из стеклофибры, хорошо смачивается расплавом пластифицированного полимера и удерживается во взвешенном состоянии, равномерно по всему объему вяжущего, обеспечивая в эксплуатационном диапазоне температур повышение вязкости системы, сопровождающееся улучшением теплостойкости.

Совокупность отмеченных характеристик является целесообразной для изготовления основных и безосновных рулонных битумосодержащих материалов (стыковочных лент), а также штучных кровельных изделий на основе битума.

Справедливости ради стоит отметить, что при изучении гибкости на брус, образцы, наполненные стеклофibrрой, показали наиболее интересные результаты: образующиеся трещинки, ввиду армирования, после нахождения образца в покое затягивались.

Использование микрокальцита для наполнения битумной матрицы целесообразно при необходимости замещения объема битума дешевой и эффективной составляющей, например, при изготовлении безосновных рулонных битумосодержащих материалов, мастик, пропиточных составов.

В качестве промежуточного вывода можно отметить, что для достижения структурирования битумной матрицы в диапазоне высоких температур целесообразно использовать вариации наполнителей и их концентрационные содержания в композициях с учетом области применения и стоящих перед исследователем задач.

Следующей группой веществ, объединяемых с битумом были пластифицирующие компоненты, использование которых целесообразно для регулирования низкотемпературных свойств битумосодержащих композиций и материалов: основных и безосновных рулонных битумосодержащих материалов, штучных кровельных изделий на основе битума, мастик, полимерно-битумных вяжущих (ПБВ), резинобитумных вяжущих (РБВ) и т.д. В случае наполнения битума пластифицирующими компонентами, процесс будет называться пластификацией. При постановке эксперимента масло И-50, ПАБ и ЭСО вводились в битумную матрицу в количестве 4-8% с шагом ввода 0,5%. Гудрон, ввиду его относительно высокой вязкости, объединялся с битумом в количестве 10-18% с шагом дозировки 1%. Полученные данные представлены на рис.2.

Для удобства анализа полученных результатов была произведена выборка данных, представленная в табл. 5.

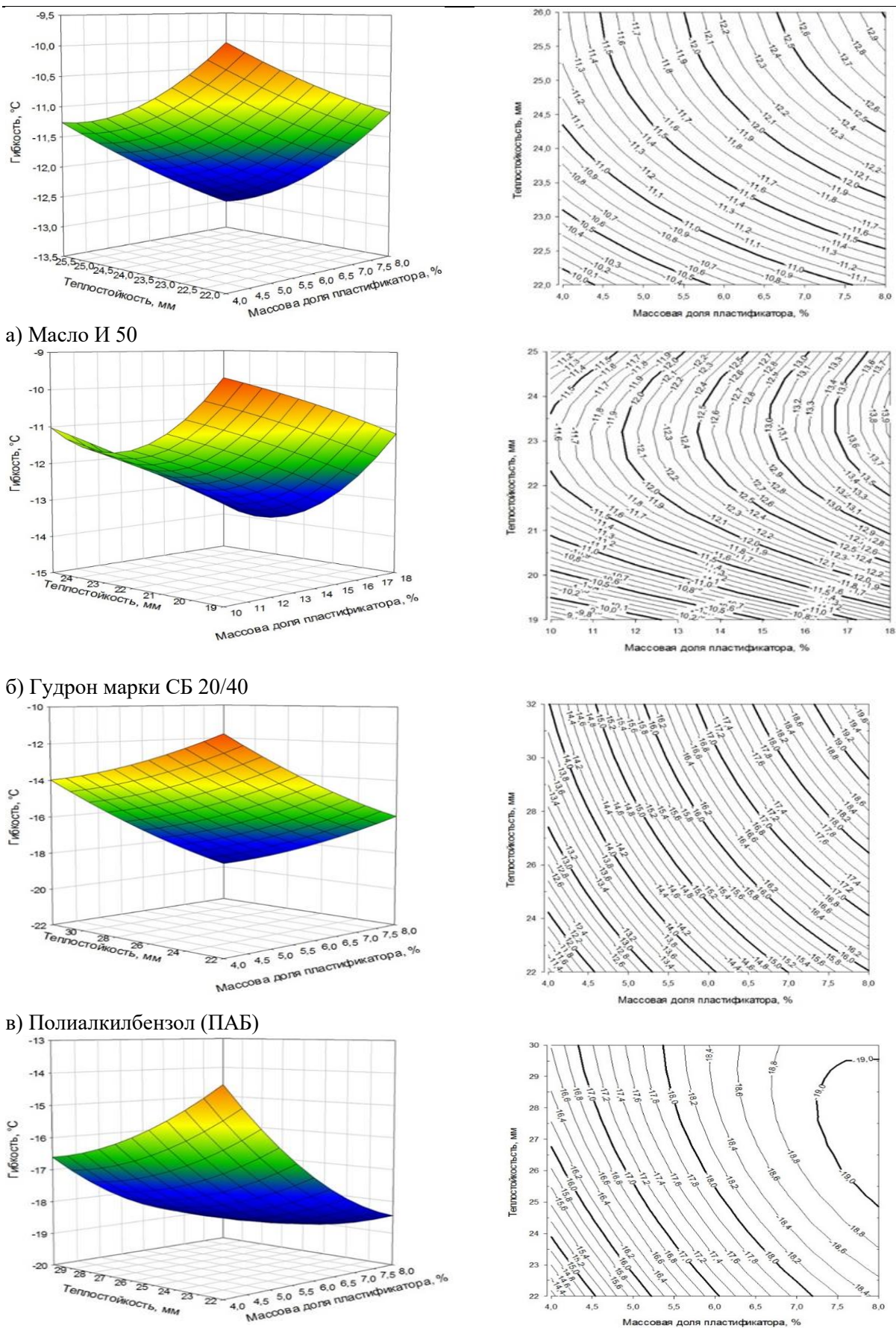


Рис. 2. Свойства битумной композиции с пластификаторами
Fig. 2. Properties of bitumen composition with plasticizers

Таблица 5. Влияние вида пластификатора на концентрационные пределы его содержания в композиции для достижение совокупности максимальных показателей (теплостойкости и гибкости на брусе)

Table 5. Influence of the type of plasticizer on the concentration limits of its content in the composition to achieve a set of maximum indicators (heat resistance and flexibility on the beam)

Вид наполнителя Type of filler	Содержание наполнителя в композиции, % The content of the filler in the composition	Показатели оптимизации Optimization metrics	
		гибкость на брусе, °C flexibility on the bar	теплостойкость, мм heat resistance
масло промышленное марки И-40 industrial oil brand I-40	8,0	-13,0	22,0
экстракт селективной очистки масел (ЭСО) selective oil extract (ESP)	7,5-8	-19,0	29,0
полиалкилбензол (ПАБ) polyalkylbenzene (PAB)	8,0	-19,6	22,0
гудрон марки СБ 20/40 tar brand	18,0	-13,9	19,0

В соответствии с полученными результатами, наиболее перспективным пластифицирующим компонентом, позволяющим в широком диапазоне управлять как гибкостью системы при отрицательных температурах, так и теплостойкостью является ЭСО. Однако, в случае необходимости отрегулировать только низкотемпературные характеристики наполненных битумных систем эффективно с этой задачей справляется ПАБ. Более того, выполненный ряд исследований по изучению влияния ПАБ на битумные композиции позволяет утверждать, что такие системы отличаются повышенными адгезионными и когезионными показателями.

Более выраженный низкотемпературный эффект от использования ПАБ проявляется при совместном наполнении битумной матрицы пластификатором и полимерным компонентом. В этом случае в рассматриваемой системе полиалкилбензол (ПАБ), проникая в структуру полимера, вызывает его набухание в короткие сроки, способствуя облегчению процесса диспергирования в битуме. При этом повышается гибкость макромолекул полимера, а также облегчается скольжение структурных элементов полимерной сетки относительно друг друга, за счет чего улучшаются низкотемпературные свойства всей композиции, в том числе при наполнении ее дисперсными минеральными материалами. Подобные эффекты могут быть использованы в технологии приготовления ПБВ для асфальтобетонных смесей, мастик, герметиков и т.д. Рассмотрим еще одну группу добавок в битум – твердые воски. В виду специфики их действия воски называют процессинговой добавкой, так как они могут быть использованы для понижения высокой вязкости полимеров, смол и битумных систем. Для регулировки и оптимизации реологических характеристик многокомпонентных композиций на их основе, а также для облегчения смешения масс в процессе приготовления. В дорожно-строительной отрасли воски нашли применение как структурный модификатор битума в производстве асфальтобетона, а также кровельных материалов и гидроизоляции. Учитывая, что твердые воски способны увеличивать термостойкость, снижать температурные диапазоны работы с композициями и отрицательное влияние низких температур на системы, а также формировать сетчатую структуру во время охлаждения.

В рамках исследования представляло интерес изучение влияния концентрации восков на теплостойкость и гибкость битумной матрицы. Для этого битумные композиции, наполненные восками Viskobit, Titan, Licomont BS, Sasobit в диапазоне дозировки 1,0 – 2,0% с шагом в 0,2% испытывали на показатели теплостойкости и гибкости на брусе. Полученные результаты представлены на рис.3.

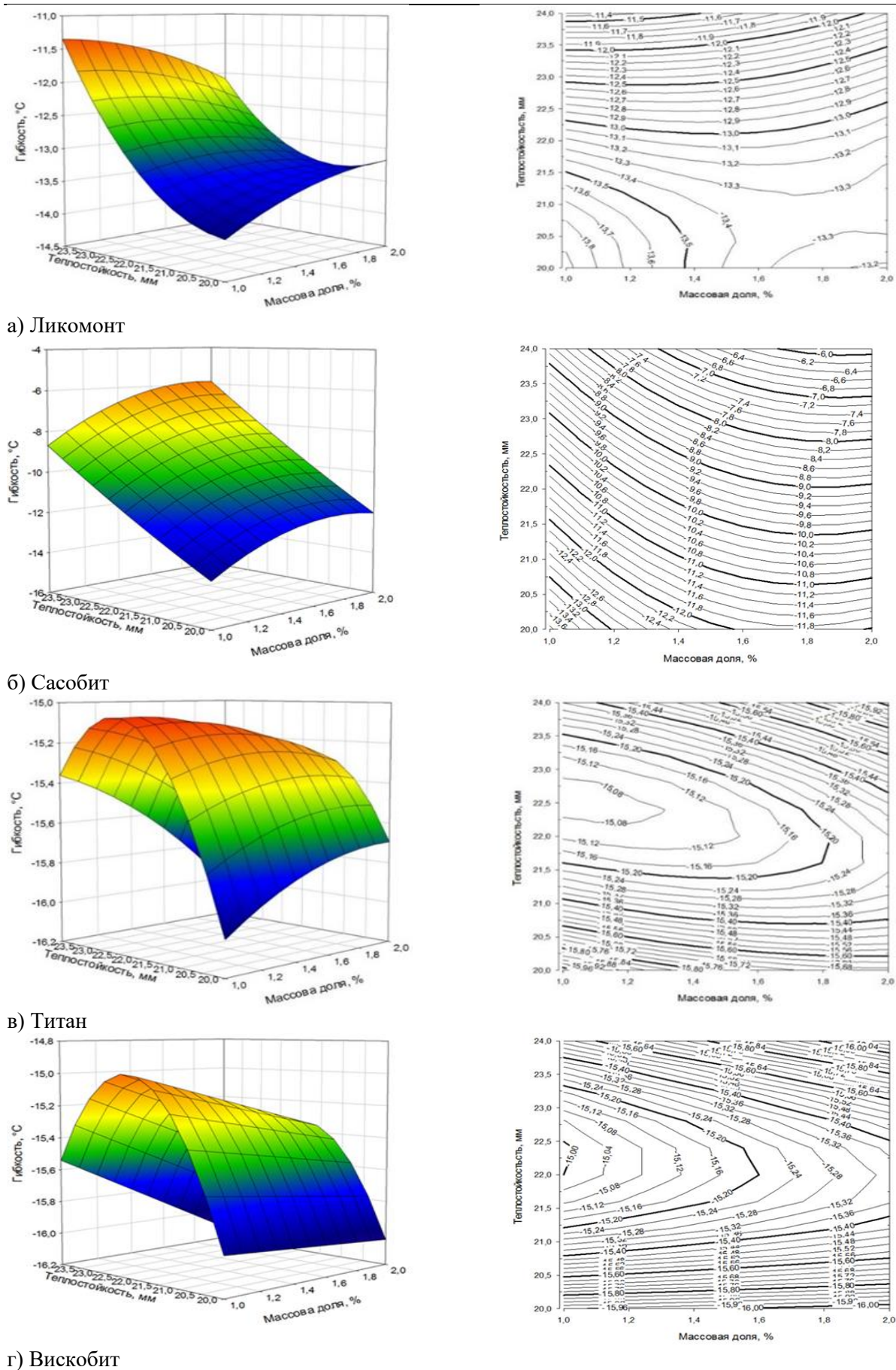


Рис. 3. Свойства битумной композиции с восками
Fig. 3. Properties of bituminous composition with waxes

Для удобства выполнения сравнительного анализа рассмотрим табл. 6

Таблица 6. Влияние вида воска на концентрационные пределы его содержания в композиции для достижение совокупности максимальных показателей (теплостойкости и гибкости на брусce)

Table 6. Influence of the type of wax on the concentration limits of its content in the composition to achieve a set of maximum indicators (heat resistance and flexibility on the beam)

Вид наполнителя Type of filler	Содержание наполнителя в композиции, % The content of the filler in the composition	Показатели оптимизации Optimization metrics	
		гибкость на брусce, °C flexibility on the bar	теплостойкость, мм heat resistance
Viskobit	1,2	-15,9	20
Titan	1,0	-16,0	20
Licomont BS	1,0	-13,9	20
Sasobit	1,0	-13,7	20

Как видно, концентрации воска в битуме, для достижения максимальных значений совокупности свойств наполненной битумной системы, одинаковы и составляют 1%. Дальнейшее увеличение содержания воска в битумной матрице является не целесообразным в виду отсутствия ярко выраженного эффекта по гибкости и существенного удорожания получаемой композиции. Полученные результаты демонстрируют, что наилучшим образом себя зарекомендовали синтетический воск Titan и полиэтиленовый воск Viskobit. Эти структурирующие добавки плавятся при температуре 90-95°C и равномерно распределяются в объеме битумного вяжущего, практически не изменяя его вязкость. В эксплуатационном диапазоне температур от 5 до 45°C молекулы воска находятся в кристаллическом состоянии, обеспечивая структурообразование, что в свою очередь способствует стабилизации свойств системы.

Вывод. В процессе постановки задачи и выполнения исследования, а также анализа полученных результатов было изучены 3 группы добавок-наполнителей битумной матрицы. В соответствии с полученными результатами наиболее перспективными пластифицирующими компонентами являются ЭСО и ПАБ, сохраняющие гибкость композиции при -19°C при концентрации 8% от массы битума.

Было установлено, что в битумных системах улучшения низкотемпературных свойств, то есть снижения температуры гибкости, можно добиться за счет пластификации битумной матрицы, а высокотемпературных, то есть температуры размягчения и теплостойкости – за счет ее структурирования.

Управление высокотемпературными характеристиками и теплостойкостью битумных композиций эффективно осуществлять за счет надмолекулярной модификации, которая может быть реализована по механизму дисперсного армирования системы микронаполнителем или фиброй.

Совокупность максимальных показателей (теплостойкости и температуры размягчения) была достигнута при наполнении битумной матрицы микрокальцитом в количестве 30%; полиамидной фиброй и микроцеллюлозой при введении 7,5%; резинового порошка необходимо 12%, минимальное содержание наполнителя в системе необходимо при использовании стекловолоконной фибры 1,5 %.

Очевидно, что регулировать теплостойкость системы путем введения в битум воска – технически и экономически нецелесообразно. Использование этого компонента оправдано как технологической добавки в совокупности с набором прочих добавок для облегчения перемешивания и регулирования технологических температур работы с композициями.

Таким образом, используя комплексные наполнения битумной матрицы при проектировании битумных композиций с возможностью регулирования и нормирования их свойств (показателей оптимизации) возможно получение экономических и эксплуатационных эффектов.

Библиографический список:

1. Мусостов Ш.И., Сангариева Э.Н., Апаева М.Х. Модификация битумов полимерами // Вестник магистратуры. 2021. №4-1 (115). С. 29-34.
2. Евдокимова Н.Г., Лунева Н.Н. О направлениях использования добавок различной природы для модифицирования свойств битумов // Баш. хим. ж.. 2016. № 4. С. 49-62.
3. Христофорова А.А., Филиппов С.Э., Соколова М.Д. Применение новых модифицирующих добавок в материалах дорожно-строительного назначения // Инновации в науке. 2012. № 14-1. С. 122-127.
4. Loise, V., Caputo, P., Porto, M., Calandra, P., Angelico, R., Oliviero Rossi, C. A review on Bitumen Rejuvenation: Mechanisms, materials, methods and perspectives // Applied Sciences. 2019. № 9(20). 4316.
5. Joohari, I. B., Giustozzi, F. Chemical and high-temperature rheological properties of recycled plastics-polymer modified hybrid bitumen // Journal of Cleaner Production. 2020. 276. 123064.
6. Белова Н.А., Кортювенко Л.П., Страхова Н.А. Добавки в битумы // Вестник ДГТУ. Технические науки. 2018. №3. С. 175-184
7. Иноземцев С.С., Королев Е.В. Техничко-экономическая эффективность применения наномодифицированного наполнителя для асфальтобетона // Вестник МГСУ. 2018. №4 (115). С. 536-443.
8. Поляков И.В., Баранников М.В., Поляков В.С. Использование полимерсодержащих отходов производства термопластов для модификации нефтяных битумов // Производство и использование эластомеров. 2020. №2. С. 28-33.
9. Вязенков А. А., Арзамасцев С. В. Базальтонаполненная полимербитумная мастика // Вестник СГТУ. 2013. №1 (72). С. 59-62.
10. Porto, M., Caputo, P., Loise, V., Eskandarsefat, S., Teltayev, B., & Oliviero Rossi, C. Bitumen and bitumen modification: A review on latest advances // Applied Sciences. 2019. 9(4). 742.
11. Лебедев М.С. Чулкова исследование реологических свойств битумных композиций, наполненных золами-уноса различного состава / Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. № 11. С. 47-52.
12. Ярцев В.П., Долженкова М.В., Петрова Н.В. Влияние наполнителей и нанодобавок на эксплуатационные свойства композитов на основе битума / Вестник ТГТУ. 2014. Том 20. № 4. С. 801-809.
13. ГОСТ 31015-2002. Смеси асфальтобетонные и асфальтобетон щебеночно-мастичные. Технические условия. Введ. 01.05.2003. – М.:Из-во Стандартов, 2003. 27 с.
14. Гридчин А.М., Ядыкина В.В. Особенности взаимодействия битума с минеральными материалами из кислых пород // Вестник ХНАДУ. 2008. №40. С. 13-16.
15. Тюрюханов К.Ю., Пугин К.Г. Исследование взаимодействия битума с минеральными частицами в асфальтобетоне // Транспортные сооружения. 2018. Т. 5. № 1. С. 19.
16. Ширяев А.О., Высоцкая М.А. Минеральный порошок в современной системе проектирования асфальтобетонных систем // Вестник БГТУ имени В. Г. Шухова. 2022. №2. С. 8-19.
17. Ярмолинская Н.И. Дорожный асфальтобетон с применением минеральных порошков из техногенных отходов промышленности: учеб.пособие. 2-е изд., перераб. и доп. - Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2007. 337 с.
18. Gao Y., Zhang Y., Gu F., Xu T., Wang H. Impact of minerals and water on bitumen-mineral adhesion and debonding behaviours using molecular dynamics simulations // Construction and Building Materials. 2018. № 171. Pp. 214-222.
19. Chen J.S., Kuo P.H., Lin P.S., Huang C.C., Lin K.Y. Experimental and theoretical characterization of the engineering behavior of bitumen mixed with mineral filler // Materials and Structures. 2008. № 41(6). Pp. 1015-1024.
20. Marochio P.A.X.L.P., van de Ven M., Skarpas S.E.T. Evaluation of epoxy modification in asphalt mastic // Materials and Structures. 2020. 53. 120.

References:

1. Musostov Sh.I., Sangarieva E.N., Apaeva M.Kh. "Modification of bitumen by polymers". *Bulletin of the Magistracy* 4-1.115 (2021): 29-34. (In Russ)
2. Evdokimova N.G., Luneva N.N. "On the directions of using additives of various nature to modify the properties of bitumen". *Bash. chem. Zh.* 4 (2016): 49-62. (In Russ)
3. Khristoforova A.A., Filippov S.E., Sokolova M.D. The use of new modifying additives in road construction materials. *Innovations in Science* 14-1 (2012): 122-127. (In Russ)
4. Loise, Valeria, et al. "A review on Bitumen Rejuvenation: Mechanisms, materials, methods and perspectives". *Applied Sciences* 9.20 (2019): 4316.
5. Joohari, I. B., Giustozzi, F. "Chemical and high-temperature rheological properties of recycled plastics-polymer modified hybrid bitumen". *Journal of Cleaner Production* 276 (2020): 123064.
6. Belova N.A., Kortovenko L.P., Strakhova N.A. Bitumen additives. *Bulletin of the DSTU. Technical science* 3 (2018): 175-184. (In Russ)
7. Inozemtsev S.S., Korolev E.V. "Technical and economic efficiency of the use of nanomodified filler for asphalt concrete". *Bulletin of MGSU* 4.115 (2018): 536-443. (In Russ)

8. Polyakov I.V., Barannikov M.V., Polyakov V.S. "The use of polymer-containing wastes from the production of thermoplastics for the modification of petroleum bitumen". *Production and use of elastomers* 2 (2020): 28-33. (In Russ)
9. Vyazenzov A. A., Arzamastsev S. V. "Basalt-filled polymer-bitumen mastic". *Vestnik SGTU* 1.72 (2013): 59-62. (In Russ)
10. Porto, Michele, et al. "Bitumen and bitumen modification: A review on latest advances". *Applied Sciences* 9.4 (2019): 742.
11. Lebedev M.S. "Chulkova study of the rheological properties of bituminous compositions filled with fly ash of various compositions". *Vestnik BSTU im. V.G. Shukhov* 11 (2016): 47-52. (In Russ)
12. Yartsev V.P., Dolzhenkova M.V., Petrova N.V. "Influence of fillers and nanoadditives on the performance properties of bitumen-based composites". *Vestnik TSTU* 20.4 (2014): 801-809. (In Russ)
13. GOST 31015-2002. Asphalt-concrete mixtures and crushed stone-mastic asphalt concrete. Technical conditions. Introduction May 1, 2003. - M.: Standards Publishing House, 2003. 27 p.
14. Gridchin A.M., Yadykina V.V. "Features of the interaction of bitumen with mineral materials from acidic rocks". *Bulletin of KhNADU* 40 (2008): 13-16. (In Russ)
15. Tyuryukhanov K.Yu., Pugin K.G. "Study of the interaction of bitumen with mineral particles in asphalt concrete". *Transport facilities* 5.1 (2018): 19-23. (In Russ)
16. Shiryaev A.O., Vysotskaya M.A. "Mineral powder in the modern system of designing asphalt concrete systems". *Bulletin of BSTU named after V. G. Shukhov* 2 (2022): 8-19. (In Russ)
17. Yarmolinskaya N.I. Road asphalt concrete with the use of mineral powders from technogenic industrial waste: textbook. 2nd ed., revised. and additional - Khabarovsk: Pacific Publishing House. state un-ta (2007): 337 p. (In Russ)
18. Gao, Yangming, et al. "Impact of minerals and water on bitumen-mineral adhesion and debonding behaviours using molecular dynamics simulations." *Construction and Building Materials* 171 (2018): 214-222.
19. Chen, Jian-Shiuh, et al. "Experimental and theoretical characterization of the engineering behavior of bitumen mixed with mineral filler." *Materials and Structures* 41.6 (2008): 1015-1024.
20. Apostolidis, Panos, et al. "Evaluation of epoxy modification in asphalt mastic." *Materials and Structures* 53.5 (2020): 1-15.

Сведения об авторах:

Киндеев Олег Николаевич, аспирант кафедры автомобильных и железных дорог; kindeev.o@yandex.ru; ORCID: 0000-0002-0518-4967

Высоцкая Марина Алексеевна, кандидат технических наук, доцент кафедры автомобильных и железных дорог; ro-ruri@rambler.ru; ORCID: 0000-0003-4572-7839

Анастасия Владимировна Курлыкина, аспирант кафедры автомобильных и железных дорог; anastasiyakurlikina@yandex.ru; ORCID:0000-0003-3265-5856

Information about the authors:

Oleg N. Kindeev, Post-graduate Student, Department of Automobile and Railways; kindeev.o@yandex.ru; ORCID: 0000-0002-0518-4967

Marina A. Vysotskaya, Cand. Sci. (Eng), Assoc.Prof., Department of Automobile and Railways; ro-ruri@rambler.ru; ORCID: 0000-0003-4572-7839

Anastasia V. Kurlykina, Post-graduate Student, Department of Automobile and Railways; anastasiyakurlikina@yandex.ru; ORCID:0000-0003-3265-5856

Конфликт интересов/ Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 13.01.2023.

Одобрена после/рецензирования Revised 16.02.2023.

Принята в печать/ Accepted for publication 16.02.2023.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 536.46

DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-1-207-214

Оригинальная статья /Original Paper

Исследование процессов горения жидкого топлива в электростатическом поле

Р.В. Муканов, Ю.А. Аляутдинова, С.П. Стрелков

Астраханский государственный архитектурно-строительный университет,
414056, Астрахань, ул. Татищева, д. 18, Россия

Резюме. Цель. В статье приведены результаты экспериментальных исследований по воздействию высокопотенциального электростатического поля на горение жидкого топлива. **Метод.** Экспериментальные исследования проводились на разработанной лабораторной установке, позволяющей обеспечить горение жидкого топлива в высокопотенциальном электростатическом поле с возможностью изменения полярности. Смена полярности подаваемого напряжения на электродную систему экспериментальной установки приводила к повышению скорости горения топлива в первом случае, и к его затуханию, во втором. **Результат.** Проведены исследования, доказывающие влияние электростатического поля на скорость горения и снижения содержания вредных компонентов, (сажи и монооксида углерода) в продувках сгорания топлива. На основании полученных значений скорости горения топлива от подаваемого напряжения были построены графические зависимости, на которых выделены области линейного и нелинейного изменения параметров горения. **Вывод.** Результаты проведенных исследований могут быть использованы для создания новых высокоэффективных горелочных устройств для котельных установок, работающих на жидком топливе. Эффект снижения скорости горения может быть использован для создания устройств противопожарной безопасности, блокирующих распространение пламени во время пожара.

Ключевые слова: котельные установки, дизельное топливо, высокопотенциальное электростатическое поле, электродная система, высоковольтный блок питания

Для цитирования: Р.В. Муканов, Ю.А. Аляутдинова, С.П. Стрелков. Исследование процессов горения жидкого топлива в электростатическом поле. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023; 50(1):207-214. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-1-207-214

Investigation of liquid fuel combustion processes in an electrostatic field

R.V. Mukanov, Yu.A. Alyautdinova, S.P. Strelkov

Astrakhan State University of Architecture and Civil Engineering,
18 Tatishcheva St., Astrakhan 414056, Russia

Abstract. Objective. The article presents the results of experimental studies on the effect of a high-potential electrostatic field on the combustion of liquid fuel. **Method.** Experimental studies were carried out on the developed laboratory installation, which makes it possible to ensure the combustion of liquid fuel in a high-potential electrostatic field with the possibility of changing the polarity. The change in the polarity of the applied voltage to the electrode system of the experimental setup led to an increase in the fuel burning rate in the first case, and to its attenuation in the second. **Result.** In this paper, studies have been carried out proving the effect of an electrostatic field on the burning rate and reducing the content of harmful components (soot and carbon monoxide) in fuel combustion purges. Based on the values of the fuel burning rate obtained as a result of the experiments, graphic dependences were constructed on the applied voltage, on which the areas of linear and non-linear changes in the combustion parameters were identified. **Conclusion.** The results of the research carried out can be used to create new highly efficient burners for liquid fuel boilers. The effect of reducing the burning rate can be used to

create fire safety devices that block the spread of flame during a fire.

Key words: boiler plants, diesel fuel, high-potential electrostatic field, electrode system, high-voltage power supply

For citation: R.V. Mukanov, Yu.A. Alyautdinova, S.P. Strelkov. Investigation of liquid fuel combustion processes in an electrostatic field. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2023; 50(1):207-214. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-1-207-214

Введение. На современных крупных ТЭС из жидких видов топлива в основном применяется мазут, который является остаточным продуктом переработки сырой нефти, но на небольших котельных для получения тепла и электричества используется печное топливо, получаемое из дизельных фракций вторичной перегонки нефти, что делает его неплохой заменой углю и мазуту.

Популярность печного (дизельного) топлива выросла благодаря массовому использованию дизельных двигателей внутреннего сгорания в автомобильной отрасли, а также благодаря появлению большого выбора бытовых котлов для отопительных систем [1].

Котельные установки, особенно малой мощности, на жидком топливе в настоящее время довольно популярны как в России, так и за рубежом, особенно в тех регионах, где не была проведена газификация. Это обусловлено тем, что жидкое топливо, можно использовать практически при любых условиях климата, его легко транспортировать и хранить. Кроме того, такие котельные могут работать не только на мазуте, отработанном масле и дизельном топливе, но и на газообразном топливе, при замене распылительных форсуночных устройств [2-4].

Однако жидкое топливо кроме несомненных достоинств обладает и рядом существенных недостатков. Для обеспечения полноты сгорания жидкого топлива его необходимо распылять в топку с минимальными параметрами дисперсности (диаметр капель распыла) [4-8], обеспечив близкие к идеальному смесеобразование с окислителем.

Если эти условия не соблюдаются, то в дымовых газах кроме продуктов полного сгорания - углекислого газа и паров воды, будут присутствовать также продукты неполного сгорания, такие как монооксид углерода CO, метан CH₄. Следует иметь в виду, что в продуктах сгорания имеются и токсичные компоненты. К ним кроме CO относятся углеводороды, окислы азота, альдегиды, сернистый газ, при работе котельной установки на сернистом топливе [1].

Постановка задачи. Повышение качества и интенсификации процессов горения является актуальной задачей, и её решение позволит повысить полноту сгорания органического жидкого топлива и позволит снизить токсичность, повысив экологичность уходящих дымовых газов. В настоящее время традиционные способы управления процессами горения, а именно регулирование подачи топлива и окислителя, становятся всё менее эффективны, ими сложно добиться высокого качества процесса горения топлива. Несовершенство этих процессов влияет на неполноту сгорания топлива и высокую токсичность выбросов дымовых газов в атмосферу котельных, работающих на органическом жидком топливе.

В научно-технической литературе встречаются упоминания о проведении экспериментальных исследований по влиянию на процесс горения топлива, электрических полей разной интенсивности, подведенных к зоне горения [9-13]. Результаты экспериментальных исследований позволяют сделать вывод, что воздействие на факел горения электростатических и магнитных полей приводит к изменению характера горения органического топлива, и на основе этого эффекта возможно создание локальных устройств управления и контроля процессами горения. Опубликованные в этом направлении работы хоть и подтверждают наличие воздействия полей на процесс горения, однако в них нет четкого обоснования результатов экспериментальных исследований, встречаются и противоречивые результаты похожих экспериментов, проведенных разными авторами.

Влияние электрического поля на пламя связано с наличием в последнем положительно и отрицательно заряженных частиц, электронов, ионов [14]. С помощью много-

численных экспериментов установлено, что в пламени присутствует разделение зарядов, а именно: отрицательный заряд находится внизу в предпламенной зоне, а положительный в верхней, в его более яркой части факела. Вероятно, это обусловлено наличием носителей заряженных частиц - ионов, радикалов [16-18]. Наличие свойств электропроводности пламени приводит к изменению формы факела, характера горения при размещении его в непосредственной близости от электромагнитных полей [18].

Также заметное влияние на факел пламени оказывает направление электрического поля, приложенного извне, при этом выделяют два основных направления заряда: вертикальное и горизонтальное. В данном экспериментальном исследовании используется вертикальное направление заряда с разной полярностью, когда два электрода расположены один над другим соосно в вертикальной плоскости. [19-20].

Методы исследования. Для исследования процессов горения печного (дизельного) топлива в высоковольтном электростатическом поле была разработана экспериментальная установка (рис.1). Экспериментальная установка состоит из корпуса 1 выполненного из металлического профиля, нижнего 2 и верхнего 4 электродов, представляющих собой диски диаметром 100 мм выполненных из листового алюминия, толщиной 2 мм, кюветы 3 для загрузки топлива, которое будет сжигаться в ходе проведения эксперимента. Высокопотенциальное электростатическое поле создается при помощи высоковольтного блока питания 5, который с помощью экранированных кабелей присоединялся к верхнему и нижнему электродам.

Полярность присоединения высоковольтных проводов зависела от условий эксперимента, в первом случае нижний электрод установки присоединён к положительному электроду, во втором к отрицательному.

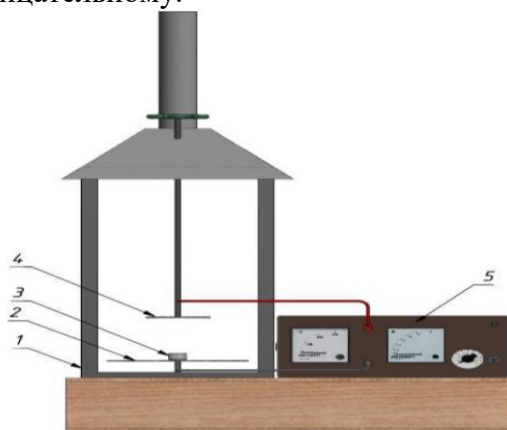


Рис. 1. Экспериментальная установка: 1 -корпус установки; 2 -нижний электрод; 3 -кювета с топливом; 4 -верхний электрод; 5 -высоковольтный источник напряжения

Fig. 1. Experimental setup: 1 - installation body; 2 - lower electrode; 3 - cuvette with fuel; 4 - top electrode; 5 - high-voltage voltage source

Обсуждение результатов. В качестве исследуемого жидкого топлива использовалось летнее дизельное топливо марки Лукойл. Испытуемое топливо набиралось в небольшую металлическую кювету 3 цилиндрической формы, которая помещалась между двумя дисками – электродами 2 и 4, расположенных параллельно друг другу. Кювета ($S=0,0025\text{м}^2$) с топливом предварительно взвешивалась на лабораторных весах, затем помещалась в центр нижнего диска, затем топливо поджигалось переносным запальником. После минуты горения пламя гасилось и кювета помещалась на весы для повторного взвешивания. Далее опыт повторялся, а на электроды подавалось напряжение 1000 вольт с лабораторной установки, с последующим увеличением напряжения шагом в 1000 В. На основе полученных данных вычислялась скорость горения топлива в высоковольтном статическом поле по формуле: [7-8].

$$v_{e.m.} = \frac{m}{t \cdot S}, \quad \text{г/с} \cdot \text{м}^2 \quad (1)$$

где m - масса сгоревшего топлива г; t - время горения топлива с; S - площадь поверхности горения m^2 .

Следует отметить, что в ходе эксперимента обнаружена очень плохая воспламеняемость дизельного топлива при комнатной температуре, а именно процесс горения не наблюдался при поджигании топлива запальником. В связи с этим было принято решение о предварительном подогреве топлива, для этих целей использовалась бытовая миниэлектроплитка. В ходе опытов было проверено несколько значений температур подогреваемого топлива, и в результате установлена наиболее подходящая для нормального горения дизельного топлива температура в $150\text{ }^{\circ}\text{C}$. Все дальнейшие опыты проводились с предварительным разогревом топлива до данной температуры. Опыты при одном и том же значении напряжения проводились не менее трех раз, и в таблицу заносились данные среднего значения скорости горения. Далее ход эксперимента изменялся и нижний электрод присоединялся к отрицательному источнику питания. Результаты экспериментов горения дизельного топлива при изменении полярности приведены в табл. 1.

Таблица 1. Зависимость скорости горения топлива в единицу времени от величины подаваемого напряжения, при нижнем расположении положительного и отрицательного электродов

Table 1. Dependence of the fuel burning rate per unit time on the value of the supplied voltage, with the lower location of the positive and negative electrodes

№ п/п	Напряжение на электродах U, В Electrode voltage	Скорость горения при нижнем расположении положительного элек- трода, $v_{г.т.}$, г/см $\times$ м ² Burning rate at the lower location of the positive electrode	Скорость горения при нижнем расположении отрицательного элек- трода, $v_{г.т.}$, г/см $\times$ м ² Burning rate at the lower location of the negative electrode
1.	0	1.000	1.000
2.	1000	1.067	1.000
3.	2000	1.100	1.033
4.	3000	1.133	1.033
5.	4000	1.167	1.033
6.	5000	1.200	1.000
7.	6000	1.267	1.000
8.	7000	1.300	1.000
9.	8000	1.333	0.967
10.	9000	1.367	0.933
11.	10000	1.400	0.900
12.	11000	1.433	0.867
13.	12000	1.467	0.833
14.	13000	1.467	0.833
15.	14000	1.500	-
16.	15000	1.533	-
17.	16000	1.600	-
18.	17000	1.600	-
19.	18000	1.600	-

В результате из полученных данных были построены графические зависимости скорости горения топлива в единицу времени от величины подаваемого напряжения (рис. 2). Точки с красной заливкой, соответствуют экспериментам, когда внизу находился положительный электрод, с синей заливкой, экспериментам - с нижним расположением отрицательного электрода. Анализируя полученные графики горения топлива при различных значениях напряжения можно заметить, что при подключении нижнего диска (электрода), с расположенной на нём кювете, к положительному контакту высоковольтного блока питания, скорость горения топлива при повышении напряжения увеличивается.

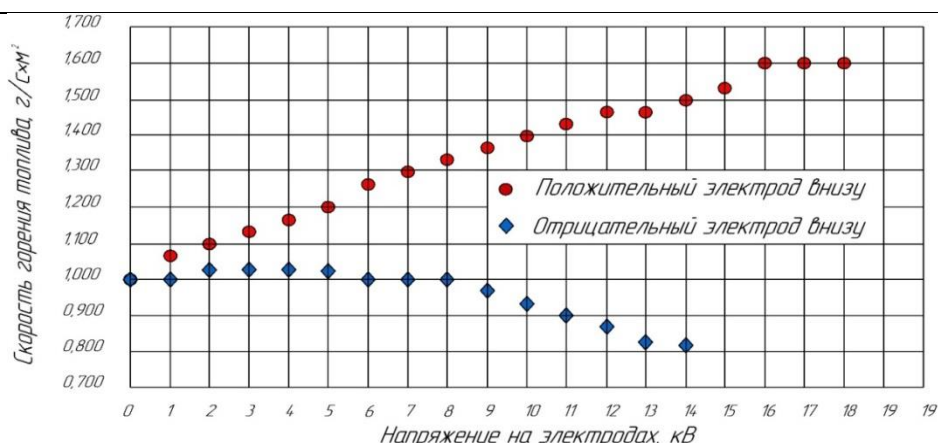


Рис. 2. График зависимости скорости горения топлива в единицу времени от величины подаваемого напряжения, при нижнем расположении положительного электрода
Fig. 2. Graph of the dependence of the fuel burning rate per unit time on the magnitude of the applied voltage, with the lower location of the positive electrode

На рис. 2 видно, что скорость горения плавно увеличивается вплоть до 16–17 кВ, далее изменения скорости горения практически не наблюдалось, а учитывая ограниченные возможности лабораторного высоковольтного блока питания, эксперименты при напряжении более 18 кВ нами, не проводились. Следует отметить, что график носит ярко выраженный линейный характер.

При реализации второй части эксперимента, (снизу отрицательный электрод) наблюдалась совсем другая картина, в начале эксперимента пламя слабо реагировало на электрическое поле, вплоть до 7–8 кВ, затем наблюдается сильное изменение характера горения, пламя факела начинает прижиматься всё сильнее к нижнему электроду, при этом скорость горения падала. При увеличении напряжения более 15 кВ, пламя угасало настолько, что его становится практически не видно в кювете с топливом, а дальнейшее повышение напряжения приводило к затуханию пламени.

При проведении экспериментов проводилась фотофиксация характера горения топлива (рис. 3–4). Если проанализировать полученные фотоснимки хода эксперимента (рис. 3) то при расположении положительного электрода снизу, можно заметить разницу в размере факела в зависимости от подаваемого напряжения.



Рис. 3. Положительный электрод внизу
Fig. 3. Positive electrode down

Например, в начальной стадии горения пламя небольшого размера и горит с незначительным изменением формы, при этом факел горения распределяется ближе к центру кюветы. При превышении напряжения 2кВ наблюдается небольшой рост факела пламени и фиксируется образования частиц сажи (неполного окисления углерода топлива)верху пламени. При 5кВ наблюдается расширение нижней зоны факела пламени у основания кюветы, которое увеличивает площадь горения, а, следовательно, происходит повышение температуры факела горения. При дальнейшем повышении напряжения размер факела продолжает расти. Наблюдения проводились до напряжения 18кВ, однако при горении топлива свыше 15кВ и далее, увеличение пламени и изменения характера горения не визуально не наблюдалось. При нижнем расположении отрицательного электрода (рис. 4),

на фотографиях эксперимента, заметно, что интенсивность горения значительно снижается с повышением напряжения на электродах, и при напряжении более 15 кВ происходит его полное затухание.



Рис. 4. Отрицательный электрод внизу
Fig. 4 Negative electrode at the bottom

В ходе экспериментом было обнаружено, что при горении свыше 10 кВ происходило заметное снижение количества выбросов продуктов сгорания в зоне горения (частицы сажи, неполного сгорания углерода в топливе). Это можно объяснить тем, что при электризации пространства в зоне горения за счет кулоновских сил взаимодействия происходит более качественное перемешивание горящего топлива с воздухом. Чтобы подтвердить это был произведен еще один эксперимент с оценкой качества сгорания топлива ручным газоанализатором «SMART SENSOR» модель AS8700A, который предназначен для замера уровня монооксида углерода в помещениях.

Схема лабораторной установки была дополнена газоанализатором 2 расположенным над кюветой с горящим топливом 1, так чтобы заборная трубка газоанализатора была выше зоны горения факела (рис. 5).

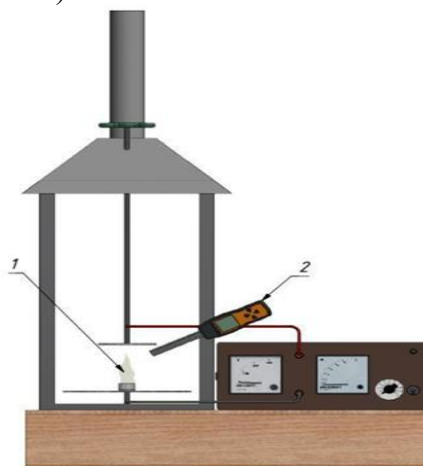


Рис. 5. Экспериментальная установка с установленным газоанализатором:
1 – кювета с горящим топливом; 2 – газоанализатор
Fig. 5. Experimental setup with installed gas analyzer: 1 – cuvette with burning fuel;
2 - gas analyzer

Благодаря проведенным экспериментам было установлено, что при повышении подаваемого напряжения на электроды до 3 кВ происходило незначительное повышение содержания СО в продуктах сгорания, однако после 3 кВ содержание СО стало плавно уменьшаться, а в диапазоне от 8 кВ до 15 кВ интенсивность снижения СО в продуктах сгорания повысилась (рис. 6). После 16 кВ содержание СО в продуктах сгорания не изменялась. Измерение содержания СО в продуктах сгорания производилось в ppm (англ. «parts per million» - «частей на миллион») - единица измерения концентрации газов и других относительных величин, аналогична по смыслу промилле и проценту.

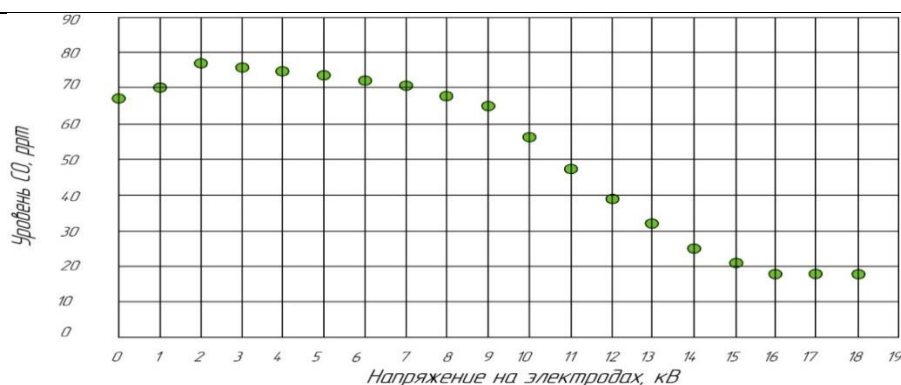


Рис. 6. Зависимость количества выделения CO от подаваемого напряжения

Fig. 6. The dependence of the amount of CO emission on the supplied voltage

Вывод. Высокопотенциальное электростатическое поле оказывает влияние на процесс горения органического жидкого топлива. Электростатическое поле при изменении полярности способно интенсифицировать, или снижать скорость горения жидкого топлива, с изменением характера и режима горения. Горение топлива в электростатическом поле способно повысить полноту сгорания жидкого топлива, с уменьшением в продуктах сгорания концентрации монооксида углерода (CO). На основе эффекта повышения скорости горения возможно создание высокоэффективных горелок для сжигания жидкого топлива. Эффект снижения скорости горения может быть использован для создания устройств противопожарной безопасности, блокирующих распространение пламени во время пожара.

Благодарности. Коллектив авторов выражает благодарность Астраханскому государственному архитектурно-строительному университету за предоставленное оборудование и лаборатории.

Библиографический список:

1. Г.Ф. Кнорре. Теория топочных процессов/ под редакцией Г.Ф. Кнорре, И.И. Палеева. М.; Л.: Энергия, 1966, 491стр.
2. Бородин, В. А. Распыливание жидкостей Текст. / В. А. Бородин. -М.: Машиностроение, 1967.-208 с.
3. Д. Г. Пажи, А. А. Корягин, Э. Л. Ламм. Распыливающие устройства в химической технологии. М.: Химия, 1975. -199 с.
4. Экнадиосянц, О. К. Получение аэрозолей. Физические основы ультразвуковой технологии / под ред. Л.Д. Розенберга. -М.: Наука, 1970. С. 337-395.
5. Пажи Д.Г., Галустов В.С. Основы техники распыливания жидкостей. -М.: Химия, 1984. 256 с.
6. Пажи, Д. Г. Распылители жидкостей. -М.: Химия, 1979.-216 с.
7. Касаткин, А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. - М.: Химия, 1973. - 750 с.
8. Бородин, В. А. Распыливание жидкостей Текст. / В. А. Бородин. - М.: Машиностроение, 1967.-208 с.
9. Френкель А.И. На заре физики. Л.: Наука, 1970. 384 с.
10. Свинцов В. Я., Муканов Р. В. Разработка метода исследования физических характеристик жидкого топлива в высоковольтном электростатическом поле // Промышленное и гражданское строительство. 2012. № 8. С. 26-28.
11. Свинцов В. Я., Муканов Р. В. Новый метод сжигания жидкого топлива в топочных устройствах котельных агрегатов // Промышленное и гражданское строительство. 2012. № 8. С. 21-23.
12. Свинцов В.Я., Шматова Е.Н., Хлыстунов М.С., Муканов Р.В. Электростатический способ диспергирования жидких топлив применительно к котельным установкам // Научно-технический вестник Поволжья. 2013. №1. С 255-258.
13. Свинцов В. Я. Влияние электрического поля на физические характеристики биосырья // Хранение и переработка сельхозсырья. 1995. № 6. С. 14-15.
14. Суворов Д.В., Кочева М.А. Механизмы воздействия электромагнитной энергии на пламя // Современные наукоемкие технологии. 2014. № 5-1. С. 182-184.
15. Хафизов Ф.Ш., Пермяков А.В., Хафизов И.Ф. Исследование влияния электромагнитного поля высокой напряженности на пламя // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2016. № 2. С. 105-110.
16. Friedman AN, Stoliarov SI. Acoustic extinction of laminar line-flames. Fire Safety Journal. 2017;93:102–113. DOI: 10.1016/j.firesaf.2017.09.002.
17. Sher E, Pinhasi G, Pokryvailo A, Bar-On R. Extinction of pool flames by means of a DC electric field. Combustion and Flame. 1993;94(3):244–252.

18. Kim MK, Chung SH, Fujita O. Effect of AC electric fields on flame spread over electrical wire. *Proceedings of the Combustion Institute*. 2011;33(1):1145–1151.
19. С.М. Решетников, И.А. Зырянов Влияние электростатического поля на макрокинетику горения алканов и керосина // Вестник КГТУ. 2011. №1. С. 120–128.
20. Митягин Ю.А., Мурзин В.Н., Ефимов Ю.А., Пищулин А.А., Пырков В.Н. Кинетика трансформации домена электрического поля в слабо связанных сверхрешетках в поперечном электрическом поле // Физика и техника полупроводников. 2004. Т. 38. № 11. С. 1353-1357.

References:

1. G.F. Knorre. Theory of furnace processes. G.F. Knorre, I.I. Paleev. M.; Leningrad: Energy, 1966; 491.
2. Borodin V. A. Spraying liquids M.: *Mashinostroenie*, 1967;208.[In Russ]
3. D. G. Pages, A. A. Koryagin, E. JI. Lamm. Spraying devices in chemical technology. M.: *Chemistry*, 1975; 199 [In Russ]
4. Eknadiosyants, OK Obtaining aerosols. Physical foundations of ultrasonic technology. ed. L.D. Rosenberg. -M.: *Nauka*, 1970; 337-395.[In Russ]
5. Pages D.G., Galustov V.S. Fundamentals of liquid spraying technique. M.: *Chemistry*, 1984; 256 [In Russ]
6. Pages, D. G. Spray liquids. M.: *Chemistry*, 1979; 216 [In Russ]
7. Kasatkin A.G. Basic processes and apparatuses of chemical technology. M.: *Chemistry*, 1973;750[In Russ]
8. Borodin V. A. Spraying of liquids. M.: *Mashinostroenie*, 1967; 208[In Russ]
9. Frenkel A.I. At the dawn of physics. L.: *Nauka*, 1970; 384 [In Russ]
10. Svintsov V. Ya., Mukanov R. V. Development of a method for studying the physical characteristics of liquid fuel in a high-voltage electrostatic field. *Industrial and civil construction*. 2012; 8: 26-28 [In Russ]
11. Svintsov V. Ya., Mukanov R. V. A new method of burning liquid fuel in furnace devices of boiler units. *Industrial and civil construction*. 2012; 8: 21-23 [In Russ]
12. Svintsov V.Ya., Shmatova E.N., Khlystunov M.S., Mukanov R.V. Electrostatic method of dispersing liquid fuels in relation to boiler plants. *Scientific and technical bulletin of the Volga region*. 2013; 1:255-258 [In Russ]
13. Svintsov V. Ya. Influence of the electric field on the physical characteristics of bio-raw materials. *Storage and processing of agricultural raw materials*. 1995; 6: 14-15 [In Russ]
14. Suvorov D.V., Kocheva M.A. Mechanisms of the impact of electromagnetic energy on the flame. *Modern science-intensive technologies*. 2014; 5(1): 182-184 [In Russ]
15. Khafizov F.Sh., Permyakov A.V., Khafizov I.F. Investigation of the influence of an electromagnetic field of high intensity on the flame. *Problems of collecting, preparing and transporting oil and oil products*. 2016; 2:105-110 [In Russ]
16. Friedman AN, Stoliarov SI. Acoustic extinction of laminar line-flames. *Fire Safety Journal*. 2017;93:102–113. DOI: 10.1016/j.firesaf.2017.09.002.
17. Sher E, Pinhasi G, Pokryvailo A, Bar-On R. Extinction of pool flames by means of a DC electric field. *Combustion and Flame*. 1993; 94(3):244–252.
18. Kim MK, Chung SH, Fujita O. Effect of AC electric fields on flame spread over electrical wire. *Proceedings of the Combustion Institute*. 2011;33(1):1145–1151.
19. S.M. Reshetnikov, I.A. Zyryanov Influence of electrostatic field on the macrokinetics of combustion of alkanes and kerosene. *Bulletin of KSTU*. 2011;1: 120–128 [In Russ]
20. Mityagin Yu.A., Murzin V.N., Efimov Yu.A., Pischulin A.A., Pyrkov V.N. Kinetics of transformation of the electric field domain in weakly coupled superlattices in a transverse electric field. *Fizika i Tekhnika Semiconductor*. 2004;38(11): 1353-1357[In Russ]

Сведения об авторах:

Муканов Руслан Владимирович, старший преподаватель кафедры «Инженерные системы и экология», rvmukanov@mail.ru

Аляутдинова Юлия Амировна, кандидат технических наук, доцент, кафедры «Инженерные системы и экология»; alautd@mail.ru

Стрелков Сергей Петрович, кандидат биологических наук, доцент, кафедры «Геодезия и кадастровый учет», sf.dekanat@mail.ru

Information about authors:

Ruslan V. Mukanov, Senior Lecturer, Department of Engineering Systems and Ecology; rvmukanov@mail.ru

Yulia A. Alyautdinova, Cand.Sci. (Eng), Assoc. Prof., Department of Engineering Systems and Ecology; alautd@mail.ru

Sergei P. Strelkov, Cand.Sci. (Biol), Assoc. Prof., Department of Geodesy and Cadastral Registration; sf.dekanat@mail.ru

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

Поступила в редакцию/Received 12.01.2023.

Одобрена после/рецензирования Revised 21.02.2023.

Принята в печать/ Accepted for publication 21.02.2023.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 691.32

DOI: 10.21822/2073-6185-2023-50-1-215-228

Оригинальная статья /Original Paper

Строительно-технические свойства вермикулитобетона и фибровермикулитобетона с вулканической пемзой при воздействии повышенных температур

Т.А. Хежев¹, Г.Н. Хаджишалапов², А.В. Журтов¹, Ф.М. Шогенова¹, А.В. Калажоков¹

¹ Кабардино-Балкарский государственный университет,
¹360004, г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173, Россия,

² Дагестанский государственный технический университет,
²367026, г. Махачкала, пр. Имама Шамиля, 70, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является разработка составов вермикулитобетона и фибровермикулитобетона с вулканической пемзой; исследование строительно-технических свойств разработанных составов с вулканической пемзой при воздействии повышенных температур. **Метод.** Рассмотрены методы повышения огнестойкости железобетонных конструкций. Исследования направлены на разработку вермикулитобетона и фибровермикулитобетона с вулканической пемзой для огнезащиты строительных конструкций и изготовления жаростойких изделий и конструкций. Для снижения стоимости вермикулитобетона предлагается его частичная замена вулканической пемзой. Для исследования вермикулитобетонов с вулканической пемзой, армированных базальтовой фиброй, использовался ротатбельный план второго порядка типа правильного шестиугольника. **Результат.** Замена части дорогостоящего заполнителя (вспученного вермикулита) пемзой приводит к незначительному повышению средней плотности композита, при этом предел прочности на изгиб и сжатие возрастают; повышаются жаростойкие свойства вермикулитобетона с вулканической пемзой, которая являясь гидравлически активной добавкой, способна вступать в реакцию гидратации с компонентами цемента, устраняя вредное влияние вторичной гидратации свободного оксида кальция. Исследовано влияние температуры нагрева на изменение строительно-технических свойств вермикулитобетонов и фибровермикулитобетонов, в том числе с добавкой пемзы. Выявлено, что дисперсное армирование базальтовыми фибрами снижает усадочные деформации, при нагреве до $t=800\text{ }^{\circ}\text{C}$ усадка уменьшается с 0,7 до 0,5 % в сравнении с исходной бетонной матрицей. **Вывод.** Зависимость «предел прочности на сжатие = f (средняя плотность бетона)» существенно зависит от наличия и соотношения пемзы в составе вермикулитобетона, при этом повышение температуры выдерживания до $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ или $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ приводит к снижению предела прочности на сжатие от 15 до 25 %, причем основное снижение происходит при нагреве до $600\text{ }^{\circ}\text{C}$, дальнейший рост температуры оказывает незначительное влияние. Зависимость предела прочности при изгибе от предела прочности на сжатие в целом сохраняется независимо от температуры нагрева, причем нагрев бетона не снижает относительный предел прочности при изгибе, т.е. соотношение прочность при изгибе/прочность на сжатие не снижается. Дисперсное фибровое армирование повышает относительный предел прочности при изгибе примерно на 70% независимо от температуры нагрева.

Ключевые слова: портландцемент, вспученный вермикулит, пемза, базальтовое волокно, армоцемент, средняя плотность, предел прочности на сжатие и изгиб, процент армирования, план эксперимента, температура, стандартный пожар, огнестойкость

Для цитирования: Т.А. Хежев, Г.Н. Хаджишалапов, А.В. Журтов, Ф.М. Шогенова, А.В. Калажоков. Строительно-технические свойства вермикулитобетона и фибровермикулитобетона с вулканической пемзой при воздействии повышенных температур. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023; 50(1):215-228. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-1-215-228

Construction and technical properties of vermiculite concrete and fibro vermiculite concrete with volcanic pumice under the influence of elevated temperatures

**T.A. Khezhev¹, G.N. Khadzhashalapov², A.V. Zhurlov¹, F.M. Shogenova¹,
A.V. Kalazhokov¹**

¹H.M. Berbekov Kabardino-Balkarian State University,

¹173 Chernyshevsky Str., Nalchik 360004, Russia,

²Daghestan State Technical University,

²367026, Makhachkala, Imam Shamil Ave., 70, Russia

Abstract. Objective. Development of compositions of vermiculite concrete and fibro vermiculite concrete with volcanic pumice. Investigation of the construction and technical properties of the developed compositions of vermiculite concrete and fibrovermiculite concrete with volcanic pumice under the influence of elevated temperatures. **Method.** Methods of increasing the fire resistance of reinforced concrete structures are considered. The research is aimed at the development of vermiculite concrete and fibro vermiculite concrete with volcanic pumice for fire protection of building structures and the manufacture of heat-resistant products and structures. To reduce the cost of vermiculite concrete, its partial replacement with volcanic pumice is proposed. For the study of vermiculite concrete with volcanic pumice reinforced with basalt fiber, a rotatable plan of the second order of the regular hexagon type was used. **Result.** Replacing a part of an expensive aggregate (expanded vermiculite) with pumice leads to a slight increase in the average density of the composite, while the bending and compressive strength increases. In addition, the heat-resistant properties of vermiculite concrete with pumice are increased. This is due to the fact that volcanic pumice, being a hydraulically active additive, is able to react hydration with cement components, eliminating the harmful effect of secondary hydration of free calcium oxide. The influence of the heating temperature on the change in the construction and technical properties of vermiculite concrete and fibrovermiculite concrete, including with the addition of pumice, has been studied. It was found that dispersed reinforcement with basalt fibers reduces shrinkage deformations, when heated to $t = 800$, the shrinkage decreases from 0.7 to 0.5% compared to the original concrete matrix. **Conclusion.** The dependence "compressive strength = f (average concrete density)" significantly depends on the presence and ratio of pumice in the composition of vermiculite concrete, while an increase in the holding temperature to 600 oC or 800 oC leads to a decrease in the compressive strength from 15 to 25%, and the main decrease occurs when heated to 600 oC, further the increase in temperature has a negligible effect. The dependence of the bending strength on the compressive strength is generally maintained regardless of the heating temperature, and the heating of concrete does not reduce the relative bending strength, i.e. the ratio of bending strength / compressive strength is not reduced. Dispersed fiber reinforcement increases the relative bending strength by about 70% regardless of the heating temperature.

Keywords: portland cement, expanded vermiculite, pumice, basalt fiber, reinforced cement, average density, compressive and bending strength, percentage of reinforcement, experiment plan, temperature, standard fire, fire resistance

For citation: T.A. Khezhev, G.N. Khadzhashalapov, A.V. Zhurov, F.M. Shogenova, A.V. Kalazhokov. Construction and technical properties of vermiculite concrete and fibro vermiculite concrete with volcanic pumice under the influence of elevated temperatures. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2023;50(1):215-228. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-1-215-228

Введение. Разработка и исследование жаростойких бетонов и огнезащитных составов является актуальной задачей. Это связано с ростом количества пожаров в нашей стране за последние годы. При этом обрушение строительных конструкций зданий и сооружений является главной причиной гибели людей и ущерба от пожаров. Поэтому исследования огнестойкости строительных конструкций и способов ее повышения прово-

дятся многими учеными [1- 7]. В нашей стране были разработаны различные виды жаростойких бетонов, исследованы их характеристики, созданы технологии их изготовления [8-11].

Анализ способов повышения огнестойкости строительных конструкций показал, что тепло- и огнезащитное покрытие из легкого бетона на основе вспученного вермикулита является самым эффективным методом повышения предела огнестойкости тонкостенных железобетонных и армоцементных конструкций, так как они существенно не утяжеляют конструкцию и улучшают ее декоративные, акустические и теплозащитные свойства [4, 12-15].

Постановка задачи. Многочисленными исследованиями выявлено, что вермикулитобетоны на цементных вяжущих обладают высокими огнезащитными и эксплуатационными свойствами, что позволяет использовать их в различных областях строительства [4, 15].

Недостатками жаростойких и огнезащитных составов являются высокий расход портландцемента, относительно высокий коэффициент теплопроводности при высоких температурах и низкая термостойкость.

Одним из материалов, являющихся эффективной заменой части портландцемента и заполнителя для жаростойких и огнезащитных составов могут быть вулканический пепел и пемза [16].

Методы исследования. Исследования были направлены на изучение строительно-технических свойств разработанных составов вермикулитобетона и фибровермикулитобетона с вулканической пемзой при воздействии повышенных температур.

В экспериментах использовались: вулканическая пемза фракции 0,16-5 мм Псыхурейского месторождения; вспученный вермикулит Санкт-Петербургской слюдяной фабрики фракции 0,16-5 мм; Белгородский портландцемент ПЦ500-ДО; базальтовая фибра изготовления ОАО «Ивотстекло» марки РНБ-9-1200-4с. Армоцемент армировали тканой сеткой № 8-07 (ГОСТ 3826-82) с размером ячейки 8×8 мм, диаметром проволоки 0,7 мм.

Приготовление смеси производили в бетономешалке принудительного действия, в которой в воду с СДО последовательно загружали сухую смесь портландцемента, базальтового волокна, вулканической пемзы, затем – вспученного вермикулита, или предварительно перемешанную всухую смесь портландцемента, базальтового волокна, вулканической пемзы и вспученного вермикулита.

Перемешивание всех компонентов продолжали до получения однородной огнезащитной фибровермикулитобетонной сырьевой смеси. Продолжительность перемешивания смеси составляла 1,5 – 2 мин.

Образцы размерами 4х4х16 см из вермикулитобетонной и фибровермикулитобетонной смеси уплотняли на стандартной виброплощадке. Подвижность смеси составляла 3-5 см по погружению конуса СтройЦНИЛ. Образцы хранились в воздушно-сухих условиях. Перед испытанием балочки высушивались при $t = 105\text{ }^{\circ}\text{C}$ до постоянной массы в сушильном шкафу.

В связи с высокой стоимостью вспученного вермикулита, исследовалась возможность его частичной замены вулканической пемзой (табл. 1, 2). Пемзой заменялся вермикулит с размерами зерен 0,16–5 мм.

В результате исследования выявлено, что замена части дорогостоящего заполнителя (вспученного вермикулита) пемзой приводит к незначительному повышению средней плотности композита, при этом предел прочности на изгиб и сжатие возрастают.

К недостаткам предложенных (табл. 1, 2) вермикулитобетонов можно отнести хрупкость, относительно небольшие пределы прочности при сжатии и изгибе. Преодоление многих недостатков жаростойких и огнезащитных бетонов и изделий возможно в результате создания фиброармированных бетонов [17, 18].

Таблица 1. Строительно-технические свойства огнезащитных и жаростойких композитов с применением вулканической пемзы

Table 1. Construction and technical properties of flame-retardant and heat-resistant composites using volcanic pumice

№№ составов	Строительно-технические свойства композита								
	средняя плотность, кг/м ³			предел прочности при изгибе (МПа) в возрасте 28 суток			предел прочности при сжатии (МПа) в возрасте 28 суток		
	температура нагрева, °C			температура нагрева, °C			температура нагрева, °C		
	105	600	800	105	600	800	105	600	800
Цемент : вермикулит по объему – 1:3									
1	720	715	710	1,6	1,3	1	2,9	2,2	2,1
Цемент : вермикулит по объему – 1:3 с добавкой пемзы фракции 0–0,16 мм по массе от цемента									
2	723	712	707	1,4	1,26	0,9	2,4	1,8	1,7
Цемент : пемза (фракции 0–1,25 мм) по объему – 1:3									
3	1461	1436	1426	3,2	2,2	1,9	11,9	7,4	6,7
Цемент : пемза (фракции 0,16–0,315 мм)+вермикулит фракции 0,315–5 мм вместо пемзы фракции 0,315–1,25 мм по объему – 1:3									
4	1676	1657	1650	3,6	2,9	1,9	14	10,7	8,5
Цемент : пемза (фракции 0,16–0,63 мм)+вермикулит фракции 0,63–5 мм вместо пемзы фракции 0,63–1,25 мм по объему – 1:3									
5	1303	1288	1280	2,1	1,9	1,9	8,8	6,5	6,4

Таблица 2. Строительно-технические свойства вермикулитобетонных огнезащитных и жаростойких композитов с применением вулканической пемзы

Table 2. Construction and technical properties of vermiculite concrete fire-resistant and heat-resistant composites using volcanic pumice

Цемент: вермикулит по объему Cement: vermiculite by volume	Замена части вермикулита пемзой по объему Replacing part of vermiculite with pumice by volume	Характеристики вермикулитобетонного композита Characteristics of vermiculite concrete composite								
		средняя плотность, average density кг/м ³			предел прочности при изгибе (МПа) в возрасте 28 сут flexural strength (MPa) at the age of 28 days			предел прочности при сжатии (МПа) в возрасте 28 сут compressive strength (MPa) at the age of 28 days		
		температура нагрева, °C temperature heating			температура нагрева, °C temperature heating			температура нагрева, °C temperature heating		
		105	600	800	105	600	800	105	600	800
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1:3	–	723	712	707	1,4	1,3	0,9	2,4	1,8	1,7
1:3	пемза фракции 0,16–0,315 мм	847	820	812	2,0	1,8	1,7	3,5	2,9	2,7
1:3	пемза фракции 0,16–0,63 мм	1068	1054	1031	2,4	2,1	2,0	3,6	3,2	3,1
1:4	–	684	643	525	1,6	1,3	1,2	3,4	2,6	2,3
1:4	пемза фракции 0,16–0,63 мм	855	832	828	1,9	1,5	1,3	3,5	2,8	2,6

Для повышения огнезащитных свойств вермикулитопемзобетонов исследовалось возможность применения поризующей добавки СДО (табл. 3).

Основные параметры фибрового армирования базальтовыми волокнами (l/d и μ_v) и количество добавки СДО определялись по результатам ранее проведенных испытаний фибровермикулитопеппобетонов.

Таблица 3. Строительно-технические свойства фибровермикулитобетона
Table 3. Construction and technical properties of fibrovermiculite concrete

Цемент : вермикулит по объему	Замена части вермикулита пемзой по объему	СДО в % от массы цемента	Процент армирования волокнами по объему	Характеристики фибровермикулитобетонного композита								
				средняя плотность, кг/м ³			предел прочности при изгибе (МПа) в возрасте 28 суток			предел прочности при сжатии (МПа) в возрасте 28 суток		
				температура нагрева, °C								
				105	600	800	105	600	800	105	600	800
1:3	пемза фракции 0,16–0,315 мм	–	–	847	820	812	2,0	1,8	1,7	3,5	2,9	2,7
1:3	пемза фракции 0,16–0,315 мм	0,3	0,6	805	780	772	3,4	3,2	3,1	4,5	3,8	3,6
1:4	пемза фракции 0,16–0,63 мм	–	–	855	832	828	1,9	1,5	1,3	3,5	2,8	2,6
1:4	пемза фракции 0,16–0,63 мм	0,3	0,6	812	792	786	3,3	3,1	3,0	4,4	3,7	3,5

В результате предварительных исследований по определению параметров фибрового армирования выявлен процент армирования $\mu_v = 1,2\%$ базальтовыми фибрами ($l=13$ мм), обеспечивающий максимальные прочностные характеристики композита.

Учитывая результаты ранее проведенных экспериментальных исследований, был составлен ротатбельный план второго порядка типа правильного шестиугольника с центральными точками [19, 20].

На рис. 1 показана геометрическая интерпретация данного плана.

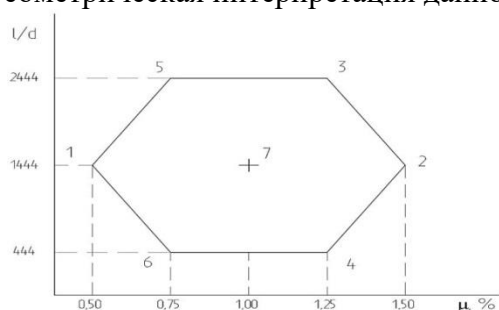


Рис. 1. План эксперимента типа правильного шестиугольника

Fig. 1. The plan of the experiment of the type of a regular hexagon

Варьируемыми факторами были основные параметры фибрового армирования:

X_1 – процент армирования по объему μ_v ;

X_2 – отношение длины волокон к их диаметру l/d .

Параметрами оптимизации являлись пределы прочности при сжатии и изгибе композита после 28 суток естественного твердения и нагрева при $t=105^{\circ}\text{C}$ и $t=800^{\circ}\text{C}$:

Y_1 – предел прочности при сжатии $R_{сж}$, МПа;

Y_2 – предел прочности при изгибе $R_{изг}$, МПа.

Основные уровни варьирования факторов определялись по результатам ранее проведенных экспериментов.

Матрица эксперимента показана в табл. 4.

Таблица 4. Матрица эксперимента

Table 4. Experiment matrix

N/N	Натуральные переменные		Матрица эксперимента				
	x_1	x_2	X_1	X_2	X_1^2	X_2^2	$X_1 * X_2$
1	0,5	1444	-1	0	+1	0	0
2	1,5	1444	+1	0	-1	0	0
3	1,25	2444	+0,5	+0,87	+0,25	+0,75	+0,43
4	1,25	444	+0,5	-0,87	+0,25	+0,75	-0,43
5	0,75	2444	-0,5	+0,87	+0,25	+0,75	-0,43
6	0,75	444	-0,5	-0,87	+0,25	+0,75	+0,43
7	1,0	1444	0	0	0	0	0

Параметры исходной бетонной матрицы для фибрового армирования базальтовыми волокнами приведены в табл. 5.

Таблица 5. Параметры исходной бетонной матрицы

Table 5. Parameters of the initial concrete matrix

№ состава	Соотношение компонентов в смеси, % по массе		Предел прочности при сжатии, МПа		Предел прочности при изгибе, МПа	
	портландцемент ПЦ500-ДО	пемза фракции 0-1,25 мм	температура нагрева, $^{\circ}\text{C}$		температура нагрева, $^{\circ}\text{C}$	
			105	800	105	800
1	60	40	20,8	15,6	7,4	6,1

В табл. 6 - 9 представлены результаты испытаний образцов на сжатие и изгиб в возрасте 28 суток естественного твердения и после нагрева до 105°C и 800°C .

Таблица 6. Экспериментальные данные испытания образцов на сжатие после нагрева до $t=105^{\circ}\text{C}$

Table 6. Experimental data of compression testing of samples after heating to $t = 105^{\circ}\text{C}$

N/N	Значения параллельных измерений функции отклика Y_1 , МПа						Среднее значение Y_1 , МПа	Дисперсия S_j^2	Коэффициент вариации, %
	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5	Y_6			
1	25,67	25,96	25,55	25,7	25,78	25,74	25,73	0,02	0,01
2	24,81	24,79	24,73	24,73	24,66	24,98	24,78	0,01	0,00
3	25,36	25,11	25,48	25,49	25,23	24,47	25,19	0,15	0,02
4	24,35	24,56	24,22	23,95	24,1	23,98	24,19	0,05	0,01
5	26,43	26,5	26,31	26,25	26,31	26,44	26,37	0,01	0,00
6	24,73	24,79	25,1	24,98	24,79	24,6	24,83	0,03	0,01
7	27,13	27,01	27,2	27,07	26,88	26,94	27,04	0,01	0,00

Таблица 7. Экспериментальные данные испытания образцов на изгиб после нагрева до $t=105^{\circ}\text{C}$

Table 7. Experimental data of bending test samples after heating to $t = 105^{\circ}\text{C}$

N/N	Значения параллельных измерений функции отклика Y_1 , МПа						Среднее значение Y_2 , МПа	Дисперсия S_j^2	Коэффициент вариации, %
	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5	Y_6			
1	12,24	12,37	11,98	12,37	12,05	11,98	12,17	0,03	0,02
2	12,88	13,19	13,2	12,75	12,87	13,07	12,99	0,03	0,01
3	12,62	12,75	12,75	12,5	12,56	12,62	12,63	0,01	0,01
4	12,24	12,49	11,98	12,11	12,24	12,37	12,24	0,03	0,01
5	12,37	12,5	12,56	12,24	12,3	12,37	12,39	0,01	0,01
6	12,05	12,18	12,31	11,92	11,86	11,98	12,05	0,03	0,01
7	13,32	13,45	13,2	13,31	13,36	13,26	13,31	0,01	0,01

Таблица 8. Экспериментальные данные испытания образцов на сжатие после нагрева до $t=800^{\circ}\text{C}$

Table 8. Experimental data of compression testing of samples after heating to $t = 800^{\circ}\text{C}$

N/N	Значения параллельных измерений функции отклика Y_1 , МПа						Среднее значение Y_1 , МПа	Дисперсия S_j^2	Коэффициент вариации, %
	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5	Y_6			
1	20,88	21,01	20,75	20,75	20,95	20,43	20,8	0,04	0,01
2	20,04	19,91	20,3	20,11	19,98	19,85	20,03	0,03	0,01
3	20,43	20,24	20,5	20,56	20,3	20,36	20,4	0,01	0,01
4	20,11	19,56	19,65	20,13	19,86	19,98	19,88	0,06	0,01
5	20,84	21,02	20,83	21,27	20,86	20,75	20,93	0,04	0,01
6	20,11	20,3	20,11	19,91	19,98	19,79	20,03	0,03	0,01
7	21,2	21,03	21,53	21,23	21,13	21,31	21,24	0,03	0,01

Таблица 9. Экспериментальные данные испытания образцов на изгиб после нагрева до $t=800^{\circ}\text{C}$

Table 9. Experimental data of bending test samples after heating to $t = 800^{\circ}\text{C}$

N/N	Значения параллельных измерений функции отклика Y_1 , МПа						Среднее значение Y_2 , МПа	Дисперсия S_j^2	Коэффициент вариации, %
	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5	Y_6			
1	11,16	11,03	11,09	10,97	11,14	11,36	11,13	0,02	0,01
2	11,94	11,88	12,07	11,66	11,81	12	11,89	0,02	0,01
3	11,55	11,42	11,62	11,61	11,55	11,62	11,56	0,01	0,01
4	11,23	11,36	11,29	11,09	11,04	11,16	11,2	0,01	0,01
5	11,36	11,49	11,55	11,23	11,16	11,22	11,34	0,03	0,01
6	11,03	10,97	11,03	11,14	10,99	11,03	11,03	0,00	0,01
7	12,2	12,33	12,07	12,27	12,14	12,1	12,2	0,01	0,01

Уравнения регрессии в кодированном виде были составлены по результатам экспериментальных исследований композита после нагрева до $t=105^{\circ}\text{C}$:

$$Y_1 = 27,04 - 0,92 X_1 + 0,73 X_2 - 1,32 X_1^2 - 2,08 X_2^2 - 0,32 X_1 X_2 ;$$

$$Y_2 = 13,3 + 0,42 X_1 + 0,21 X_2 - 0,94 X_1^2 - 0,99 X_2^2 + 0,32 X_1 X_2 ;$$

Поверхности отклика построены исходя из уравнений регрессии, представленных выше (рис. 2).

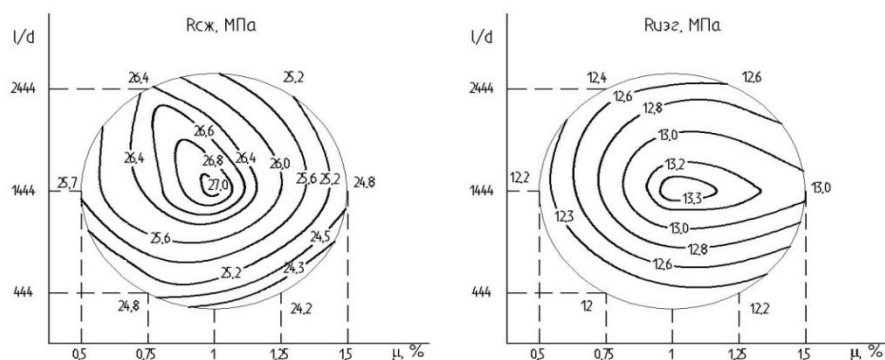


Рис. 2. Поверхности отклика: $R_{сж}$ – предел прочности при сжатии, МПа; $R_{изг}$ – предел прочности при изгибе, МПа; l/d – отношение длины волокон к их диаметру; μ – процент армирования по объему

Fig. 2. Response surfaces: R_b – compressive strength, МПа; R_f – bending strength, МПа; l/d – the ratio of the length of the fibers to their diameter; μ – the percentage of reinforcement by volume

Уравнения регрессии в кодированном виде были составлены по результатам экспериментальных исследований композита после нагрева до $t=800^\circ\text{C}$:

$$Y_1 = 21,23 - 0,48X_1 + 0,4X_2 - 0,58X_1^2 - 1,04X_2^2 - 0,22X_1X_2;$$

$$Y_2 = 12,2 + 0,39X_1 + 0,19X_2 - 0,88X_1^2 - 0,93X_2^2 + 0,04X_1X_2;$$

Поверхности отклика построены исходя из уравнений регрессии, представленных выше (рис. 3).

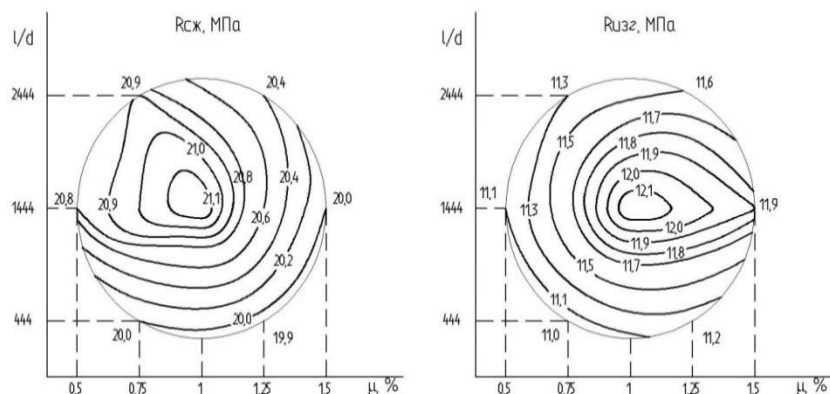


Рис. 3. Поверхности отклика: $R_{сж}$ – предел прочности при сжатии, МПа; $R_{изг}$ – предел прочности при изгибе, МПа; l/d – отношение длины волокон к их диаметру; μ – процент армирования по объему

Fig. 3. Response surfaces: R_b – compressive strength, МПа; R_f – bending strength, МПа; l/d – the ratio of the length of the fibers to their diameter; μ – the percentage of reinforcement by volume

В ходе исследования выявлено, что при проценте армирования по объему $\mu_v \approx 0,35 - 0,65\%$ и отношении длины волокон к их диаметру $l/d = 1444$ композит имеет максимальную прочность на изгиб и сжатие.

Дальнейшее повышение процента фибрового армирования бетонной матрицы ведет к снижению прочности композита на сжатие и изгиб, что объясняется ухудшением их структуры. Выявлено, что дисперсное армирование базальтовыми фибрами снижает усадочные деформации, при нагреве до $t=800^\circ\text{C}$ усадка уменьшается с 0,7 до 0,5 % в сравнении с исходной бетонной матрицей.

Анализ влияния температуры нагрева на изменение строительно-технических свойств вермикулитобетонов, в т.ч. фиброармированных, представлен на рис. 4 – 6. На рис. 4 представлена зависимость предела прочности исследованных (табл. 1 – 3) вермикулитобетонов на сжатие от средней плотности бетонов.

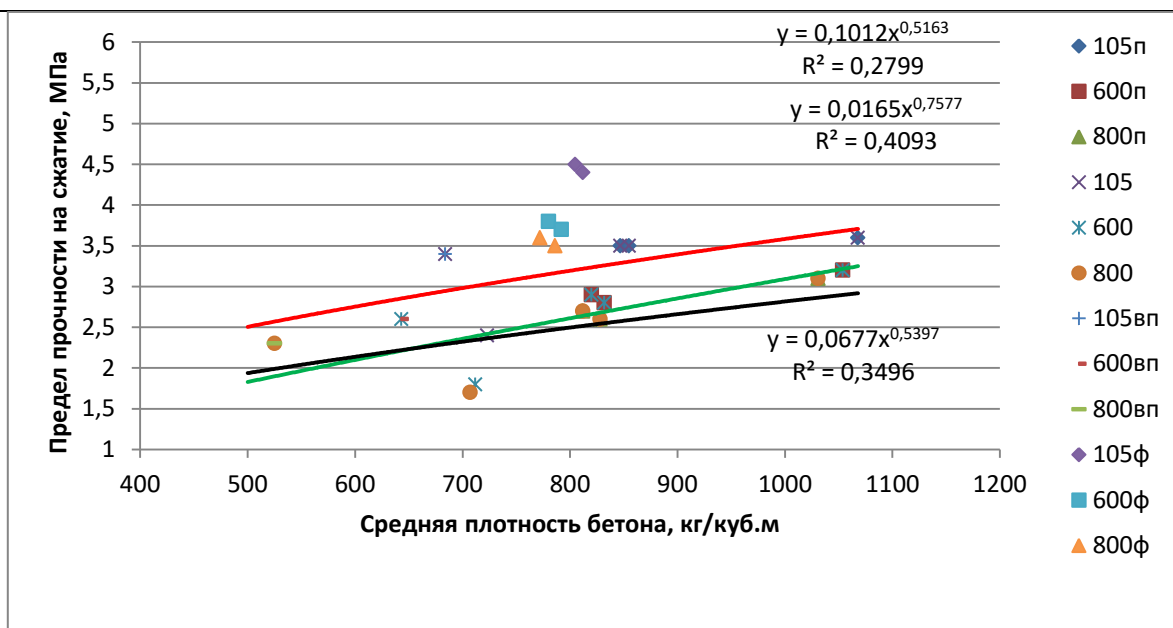


Рис. 4. Зависимость предела прочности на сжатие от средней плотности вермикулитобетонов 105, 600, 800 – температура выдерживания бетона перед испытанием, °С; п – с добавлением пемзы; ф – с фибровым армированием

Fig. 4. Dependence of the compressive strength on the average density of vermiculite concrete 105, 600, 800 – the holding temperature of concrete before testing, °C; p – with the addition of pumice; f – with fiber reinforcement

Из представленных на рис. 4 данных следует:

– зависимость «предел прочности на сжатие = f (средняя плотность бетона)» существенно зависит от наличия и соотношения пемзы в составе вермикулитобетона, при этом повышение температуры выдерживания до 600 или 800 °C приводит к снижению предела прочности на сжатие от 15 до 25 %, причем основное снижение происходит при нагреве до 600 °C, дальнейший рост температуры оказывает незначительное влияние;

– повышение предела прочности на сжатие в бетонах с фибровым армированием составляет примерно 40 % относительно неармированных бетонов независимо от температуры выдерживания.

На рис. 5 приведены для сравнения данные о снижении предела прочности на сжатие при кратковременном нагреве в сравнении с СП 27.13330, табл. 5.2, состав 24, класс И10 (данных о вермикулитобетоне в СП 27.13330 нет).

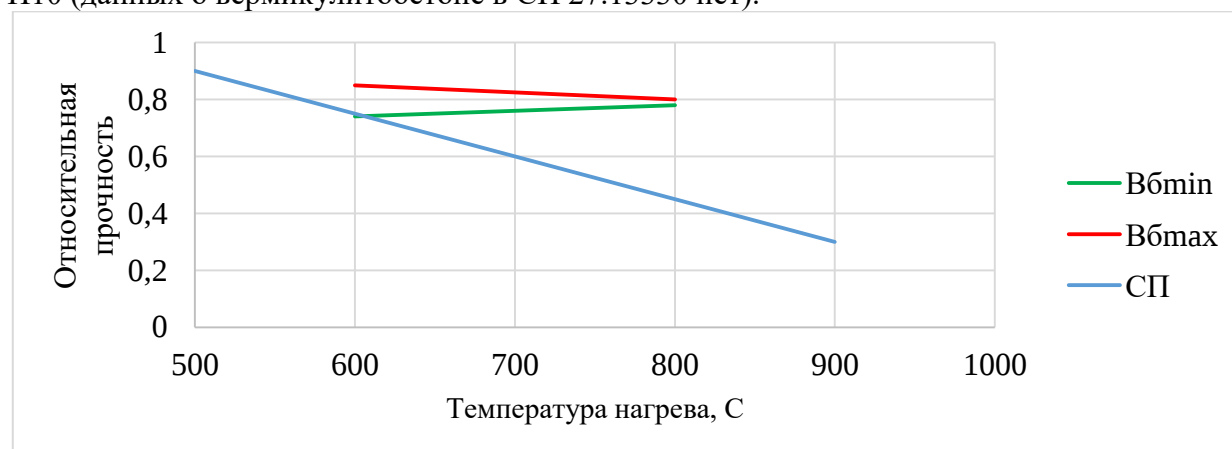


Рис. 5. Относительная прочность бетона на сжатие в зависимости от температуры кратковременного нагрева

Fig. 5. Relative compressive strength of concrete depending on the temperature of short-term heating

На рис. 6 представлена зависимость предела прочности исследованных бетонов на изгиб от предела прочности на сжатие и температуры нагрева.

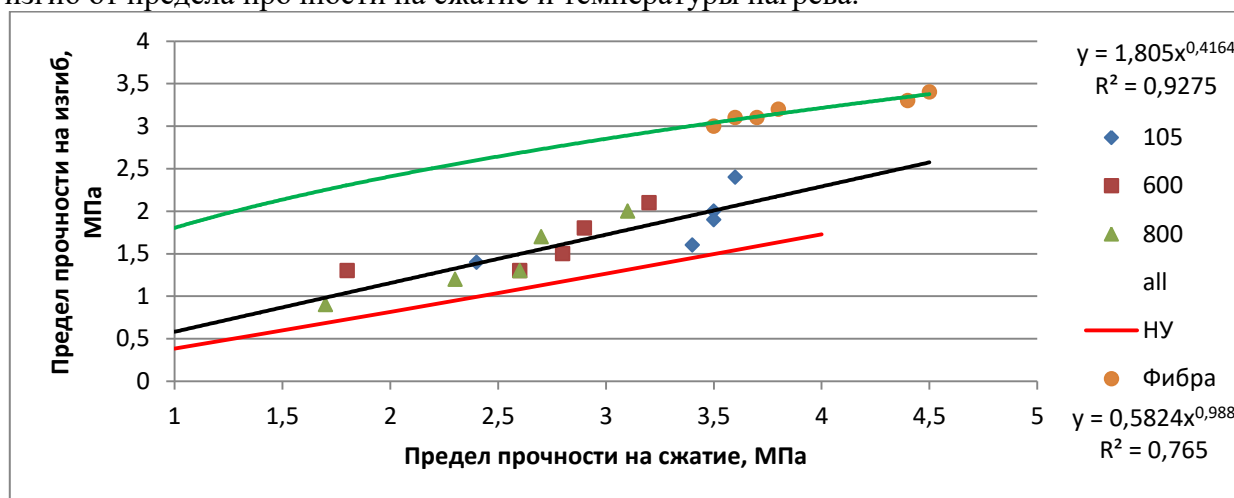


Рис. 6. Зависимость предела прочности при изгибе от предела прочности на сжатие: 105, 600, 800 – температура нагрева; НУ – нормальные условия твердения; фибра – фибровермикулитобетоны

Fig. 6. Dependence of the bending strength on the compressive strength: 105, 600, 800 – heating temperature; WELL – normal hardening conditions; fiber – fibrovermiculite concrete

Из приведенных на рис. 6 данных следует:

- зависимость предела прочности при изгибе от предела прочности на сжатие в целом сохраняется независимо от температуры нагрева, причем нагрев бетона не снижает относительный предел прочности при изгибе (соотношение прочность при растяжении/прочность на сжатие не снижается);
- дисперсное фибровое армирование повышает относительный предел прочности при изгибе примерно на 70% независимо от температуры нагрева.

Проведены исследования огнезащитных свойств разработанных огнезащитных композитов. Испытания по определению огнестойкости двухслойных армоцементных элементов проводились нами на образцах 19х19 см в горизонтальном положении на электрической муфельной печи по температурному режиму «стандартного» пожара, в соответствии с ГОСТ 30247.1–94.

За наступление предела огнестойкости по несущей способности (R) образцов условно принимали момент достижения тканой сеткой, расположенной в армоцементном слое, температуры 300 °С.

В соответствии с ГОСТ 30247.1–94, за наступление предела огнестойкости по теплоизолирующей способности (I) образцов принимали момент повышения температуры на необогреваемой поверхности образца в среднем более чем на 140 °С в сравнении с температурой образца до испытания. В момент испытания влажность мелкозернистого бетона была 3–4 %, а для вермикулитобетона – 8–10 %.

Нарушение целостности двухслойных армоцементных образцов при проведении испытаний на огнестойкость не наблюдалось. Экспериментальные данные испытаний огнестойкости двухслойных армоцементных плит с использованием пемзы в огнезащитном слое (толщины конструкционного и огнезащитного слоев 20 мм) приведены в табл.10.

Предложенные вермикулитобетоны с применением вулканической пемзы, воздухововлекающей добавки СДО и базальтовых фибр, обладая большей плотностью в сравнении с эталонным вермикулитобетоном, имеют более высокие показатели огнезащиты из-за лучшей сохранности вермикулитобетонного слоя при нагреве благодаря фибровому армированию и дополнительной поризации СДО.

С применением разработанного ПО выполнены вычисления с точностью, равной 0,001 и, получены коэффициенты k_1, k_2, k_3, k_4 , показывающие хорошую сходимость теоретических и экспериментальных данных [21].

Таблица 10. Экспериментальные данные результатов испытаний по определению пределов огнестойкости двухслойных армоцементных плит
Table 10. Experimental data of the test results for determining the limits of fire resistance of double-layer reinforced cement slabs

№.№ составов	Состав огнезащитного слоя				Средняя плотность, кг/м ³	Предел огнестойкости плит, мин	
	Цемент : вермикулит по объему	Замена части вермикулита пемзой по объему	СДО в % от массы цемента	Процент армирования волокнами по объему		по несущей способности (R)	по теплоизолирующей способности (E)
1	1:2	–	–	–	750	82	57
2	1:3	пемза фракции 0,16–0,315 мм	–	–	847	68	44
3	1:3	пемза фракции 0,16–0,315 мм	0,3	0,6	805	73	48
4	1:4	пемза фракции 0,16–0,63 мм	–	–	855	66	43
5	1:4	пемза фракции 0,16–0,63 мм	0,3	0,6	812	65	46

В итоге расчетов на разработанном ПО определены теплотехнические характеристики предложенного фибровермикулито-пемзобетона ($\rho_{cp} = 810 \text{ кг} / \text{м}^3$):

$$\lambda_o(t) = 0,180 + 0,00003 \cdot t, \quad c_o(t) = 920 + 0,63 \cdot t ;$$

По результатам теплотехнического расчета построены графики влияния толщины огнезащитного слоя на пределы огнестойкости двухслойных армоцементных элементов (рис. 7 и 8).

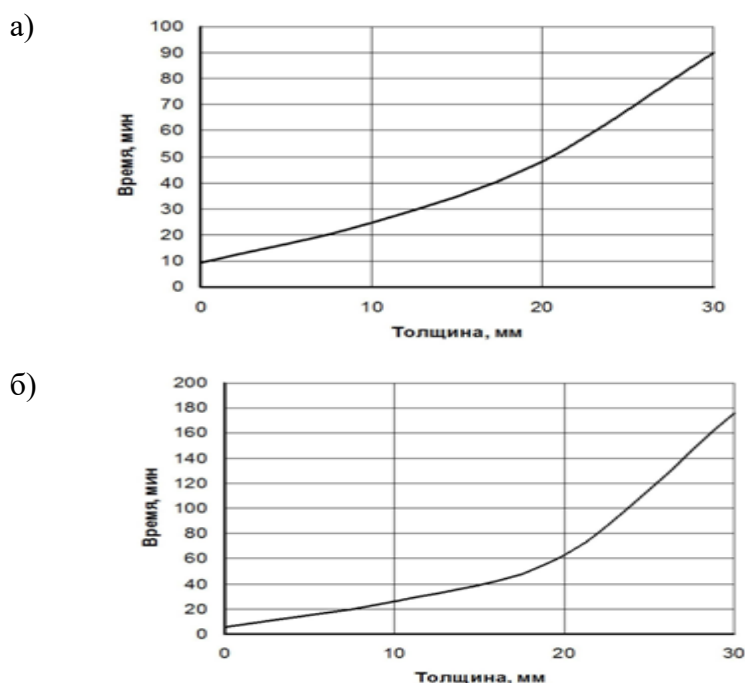


Рис. 7. Влияния толщины фибровермикулитопемзобетонного слоя на предел огнестойкости двухслойных армоцементных элементов по признаку: потери теплоизолирующей способности (а); потери несущей способности (б)

Fig. 7. The influence of the thickness of the fibrovermiculite-cement layer on the fire resistance limit of two-layer reinforced cement elements on the basis of: loss of thermal insulation ability (a); loss of load-bearing capacity (b)

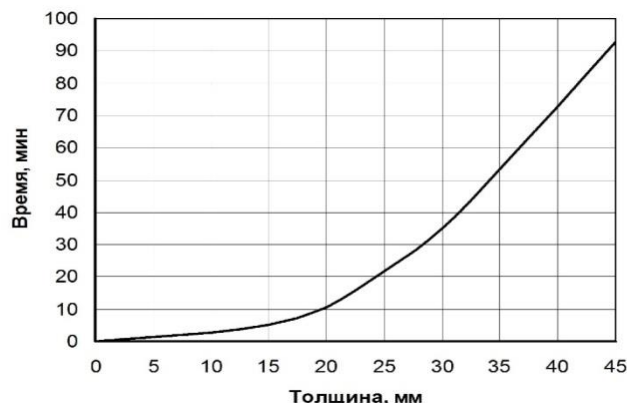


Рис. 8. Зависимость огнестойкости фибровермикулитопемзобетонных плит по признаку потери теплоизолирующей способности от толщины слоя
Fig. 8. The dependence of the fire resistance of fibro vermiculite pumice concrete slabs on the basis of the loss of thermal insulation ability on the thickness of the layer

На основе полученных зависимостей теплотехнических характеристик фибровермикулитобетонных композитов, с использованием предложенного программного обеспечения можно определять пределы огнестойкости двухслойных конструкций. Выявлено, что предложенные фибровермикулитопемзобетоны отличаются повышенными огнезащитными и прочностными характеристиками при пониженном расходе вяжущего.

Вывод. Определены конструкционные свойства разработанных вермикулитобетон с частичной заменой вермикулита пемзой, получены зависимости свойств от рецептурных факторов и температуры нагрева, доказана эффективность фибрового армирования с целью повышения предела прочности при изгибе до 70 %, в том числе после нагрева до 800 °С.

Зависимость «предел прочности на сжатие = f (средняя плотность бетона)» существенно зависит от наличия и соотношения пемзы в составе вермикулитобетона, при этом повышение температуры выдерживания до 600 °С или 800 °С приводит к снижению предела прочности на сжатие от 15 до 25 %, причем основное снижение происходит при нагреве до 600 °С, дальнейший рост температуры оказывает незначительное влияние.

Зависимость предела прочности при изгибе от предела прочности на сжатие в целом сохраняется независимо от температуры нагрева, причем нагрев бетона не снижает относительный предел прочности при изгибе, т.е. соотношение прочность при изгибе/прочность на сжатие не снижается.

Получены значения коэффициентов теплопроводности и теплоемкости фибровермикулитопемзобетона на основе анализа результатов экспериментально-теоретических исследований их огнезащитных свойств.

Библиографический список:

1. Милованов А.Ф. Огнестойкость железобетонных конструкций. М.: Стройиздат. 1986. 225 с.
2. Ильин Н.А. Последствия огневого воздействия на железобетонные конструкции. М.: Стройиздат. 1979. 128 с.
3. Милованов А.Ф. Огнесохранность железобетонных конструкций после пожара. М.: 2005. 122 с.
4. Хежев Т.А. Технология армоцементных конструкций высокой огнестойкости с теплозащитным слоем из эффективного легкого бетона: дисс. ... д-ра техн. наук. Ростов-на-Дону. 2007. 304 с.
5. Милованов А.Ф. Железобетонные температуростойкие конструкции. М.: 2005. 234 с.
6. Романенков И.Г., Зигерн-Корн В.Н. Огнестойкость строительных конструкций из эффективных материалов. М.: Стройиздат. 1984. 240 с.
7. Бушев З.П., Пчелинцев В.А., Федоренко В.С., Яковлев А.И. Огнестойкость зданий. М.: Стройиздат. 1970. 260 с.
8. Некрасов К.Д., Масленникова М.Г. Легкие жаростойкие бетоны на пористых заполнителях. М.: Стройиздат. 1982. 152 с.
9. Хаджишалапов Г.Н. Технологические факторы легких жаростойких бетонов при применении в шахте ядерных реакторов нового поколения: дисс. ... д-ра техн. наук. Ростов-на-Дону. 2006. 377 с.

10. Майзель И.А., Сухарев М.Ф. Жароупорный теплоизоляционный перлитобетон. М.: Стройиздат. 1965. 127 с.
11. Денисов А.С., Швыряев В.А. Теплоизоляционные жаростойкие торкрет-массы на основе вермикулита. М.: Стройиздат. 1973. 104 с.
12. Страхов В.Л., Крутов А.М., Давыдкин А.М. Огнезащита строительных конструкций. М.: ТИМР. 2000. 433 с.
13. Ахтямов Р.Я. «Вермивол» – новое огнезащитное покрытие на основе вспученного вермикулита // Строительные материалы. 2002. № 6. С. 6–7.
14. Романенков И.Г., Левитес Ф.А. Огнезащита строительных конструкций. М.: Стройиздат. 1991. 320 с.
15. Руководство по составам и применению теплоизоляционных и огнестойких перлитовых штукатурок. М.: Стройиздат. 1975. 15 с.
16. Ахматов М.А. Применение отходов камнепиления туфкарьеров и рыхлых пористых пород в качестве заполнителей легких бетонов и конструкций из них. Нальчик. 1981. 128 с.
17. Рабинович Ф.Н. Композиты на основе дисперсно армированных бетонов // Вопросы теории и проектирования, технология, конструкции: монография / 3-е изд., перераб. и доп. М.: АСВ. 2004. 560 с.
18. Волков И.В. Фибробетон: Состояние и перспективы применения / Промышленное и гражданское строительство. 2002. № 9. С. 37–38.
19. Налимов В.В., Чернова Н.А. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов. М.: Наука. 1965. 340 с.
20. Крыжановский И.И., Свицерская О.И. Методика планирования эксперимента при решении типовой задачи о выборе химических добавок к бетону // Математические методы в исследованиях технологии бетона: тр. Всесоюз. науч.-исслед. ин-та водоснабжения, канализации, гидротехн. сооружений и инженер. гидрогеологии. Вып. 5. Харьков. 1971. С. 102–114.
21. Хежев Т.А., Культербаев Х.П. Теплотехнический расчет огнестойкости многослойных строительных конструкций // Вестник Кабардино-Балкарского гос. ун-та / Сер. «Технические науки». Вып. 4. Нальчик. КБГУ. 2000. С. 9–11.

References:

1. Milovanov A.F. Fire resistance of reinforced concrete structures. M.: *Stroyizdat*. 1986; 225.[In Russ]
2. Ilyin N.A. Consequences of fire impact on reinforced concrete structures. M.: *Stroyizdat*. 1979; 128. [In Russ]
3. Milovanov A.F. Fire safety of reinforced concrete structures after a fire. M.: 2005; 122.[In Russ]
4. Hezhev T.A. Technology of reinforced cement structures of high fire resistance with a heat-protective layer of effective lightweight concrete: diss. ... dr of technical sciences. Rostov-on-Don. 2007; 304. [In Russ]
5. Milovanov A.F. Reinforced concrete temperature-resistant structures. Moscow: 2005; 234.[In Russ].
6. Romanenkov I.G., Ziger-Korn V.N. Fire resistance of building structures made of effective materials. M.: *Stroyizdat*. 1984; 240 [In Russ].
7. Bushev Z.P., Pchelintsev V.A., Fedorenko V.S., Yakovlev A.I. Fire resistance of buildings. M.: *Stroyizdat*. 1970; 260 [In Russ].
8. Nekrasov K.D., Maslennikova M.G. Light heat-resistant concrete on porous aggregates. M.: *Stroyizdat*. 1982; 152 [In Russ].
9. Khadzhishalapov G.N. Technological factors of light heat-resistant concretes when using new generation nuclear reactors in a mine: diss. ... doctor of technical sciences. Rostov-on-Don. 2006;377.[In Russ].
10. Maisel I.A., Sukharev M.F. Heat-resistant heat-insulating perlite concrete. M.: *Stroyizdat*. 1965; 127[In Russ]
11. Denisov A.S., Shvyryaev V.A. Heat-insulating heat-resistant shotcrete masses based on vermiculite. M.: *Stroyizdat*. 1973; 104 [In Russ].
12. Strakhov V.L., Krutov A.M., Davydkin A.M. Fire protection of building structures. M.: *TIMR*. 2000;433.
13. Akhtyamov R.Ya. "Vermivol" – a new flame retardant coating based on expanded vermiculite. *Building materials*. 2002; 6: 6-7.[In Russ].
14. Romanenkov I.G., Levites F.A. Fire protection of building structures. M.: *Stroyizdat*. 1991;320 [In Russ].
15. Guidelines on the composition and application of heat-insulating and fire-resistant perlite plasters. Moscow: *Stroyizdat*. 1975;15.[In Russ]
16. Akhmatov M.A. The use of stone-sawing waste of tuff quarries and loose porous rocks as fillers of light concrete and structures made of them. Nalchik. 1981; 128.[In Russ]
17. Rabinovich F.N. Composites based on dispersed reinforced concrete. *Questions of theory and design, technology, constructions: monograph / 3rd ed., reprint. and additional* M.: ASV. 2004; 560.[In Russ]
18. Volkov I.V. Fibrobeton: State and prospects of application. *Industrial and civil construction*. 2002; 9: 37-38.[In Russ]
19. Nalimov V.V., Chernova N.A. Statistical methods of planning extreme experiments. M.: Nauka. 1965; 340.[In Russ]

20. Kryzhanovsky I.I., Sviderskaya O.I. Methodology of experiment planning when solving a typical problem of choosing chemical additives to concrete. *Mathematical methods in concrete technology research: tr. All-Union. scientific-research. in-ta water supply, sewerage, hydraulic engineering. structures and engineer. hydrogeology..* Kharkiv. 1971; 5:102-114.[In Russ]
21. Hezhev T.A., Kulterbaev H.P. Heat engineering calculation of fire resistance of multilayer building structures. *Bulletin of Kabardino-Balkarian State University. Ser. "Technical Sciences".* Vol. 4. Nalchik. KBGU. 2000; 4: 9-11.[In Russ]

Сведения об авторах:

Хежев Толя Амирович, доктор технических наук, профессор, директор института архитектуры, строительства и дизайна, профессор кафедры строительного производства; hejev_tolya@mail.ru

Хаджишалапов Гаджимагомед Нурмагомедович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии и организации строительного производства; yarus-x@mail.ru

Журтов Артур Владимирович, кандидат технических наук, и.о. заведующего кафедрой строительного производства; zhurtovartur@mail.ru

Шогенова Фатима Мухамедовна, аспирант кафедры строительного производства; shogenova-1982@mail.ru

Калажиков Астемир Вячеславович, магистрант кафедры строительного производства

Information about the authors:

Tolya A. Khezhev, Dr. Sci. (Eng), Prof., Director of the Institute of Architecture, Construction and Design, Prof., Department of Construction Production; hejev_tolya@mail.ru

Gadzhimagomed N. Khadzhishalapov, Dr. Sci. (Eng), Prof., Head of the Department of Technology and Organization of Construction Production; yarus-x@mail.ru

Artur V. Zhurtov, Cand. Sci. (Eng), Acting Head of the Department of Construction Production; zhurtovartur@mail.ru

Fatima M. Shogenova, Post-graduate Student, Department of building production; shogenova-1982@mail.ru

Astemir V. Kalazhokov, Master's Student, Department of Construction Production

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

Поступила в редакцию/Received 22.01.2023.

Одобрена после/рецензирования Revised 21.02.2023.

Принята в печать/ Accepted for publication 21.02.2023.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 691.175.5/624.121.54

DOI: 10.21822/2073-6185-2023-50-1-229-237

Оригинальная статья/Original Paper

**Исследование работы ПВХ-мембран для инженерной гидроизоляции
в условиях повышенной сейсмичности**

В.Н. Шалимов¹, А.В. Цыбенко¹, И.Н. Гоглев¹, С.А. Логинова²

¹Корпорация «ТехноНИКОЛЬ»,

¹129110, г. Москва, ул. Гиляровского, д. 47, стр. 5, Россия,

²Ярославский государственный технический университет,

²150023, г. Ярославль, Московский пр-кт, 88, Россия

Резюме. Цель. В настоящее время к гидроизоляционным материалам, применяемым в зонах сейсмической опасности, предъявляются повышенные требования. Целью исследования является оценка возможности использования полимерных мембран LOGICBASE™ в регионах повышенной сейсмической активности на территории РФ. **Метод.** Рассмотрен механизм работы полимерных мембран в конструкциях фундаментов, в условиях постоянных перемещений и трения. Проведены эксперименты по определению коэффициента трения согласно методике государственных стандартов на разрывной машине МИРК-1000К. Исследованы образцы круглой формы из полимерных мембран на специальной установке многоосного растяжения согласно требованиям государственных стандартов. **Результат.** По результатам исследований полимерных мембран LOGICBASE™ V-SL на многоосное растяжение выявлено, что максимальная прочность образцов при разрыве составила 6948,22 кПа (~ 6,95 МПа), а удлинение образцов при разрыве составило 113,89%. Определен коэффициент трения в системе «Полимерный гидроизоляционный материал - бетонная конструкция» в условиях повышенной сейсмической активности по шкале MSK-64. **Вывод.** ПВХ-мембраны для инженерной гидроизоляции можно использовать в районах строительства с сейсмичностью до 9 баллов включительно по шкале MSK-64.

Ключевые слова: трение, мембрана, гидроизоляция, сейсмическая зона

Для цитирования: В.Н. Шалимов, А.В. Цыбенко, И.Н. Гоглев, С.А. Логинова. Исследование работы ПВХ-мембран для инженерной гидроизоляции в условиях повышенной сейсмичности. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023;50(1):229-237. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-1-229-237

Study of work of PVC membranes for engineering waterproofing under increased seismic conditions

V.N. Shalimov¹, A.V. Tsybenko¹, I.N. Goglev¹, S.A. Loginova²

¹TechnoNIKOL Corporation,

¹ 47 Gilyarovskogo St., building 5, Moscow 129110, Russia,

²Yaroslavl State Technical University,

²88 Moskovsky Ave., Yaroslavl 150023, Russia

Abstract. Objective. At present, increased requirements are imposed on waterproofing materials used in seismic hazard zones. The aim of the study is to assess the possibility of using LOGICBASE™ polymer membranes in regions of increased seismic activity in the Russian Federation. **Method.** The mechanism of operation of polymeric membranes in foundation structures under conditions of constant displacement and friction is considered. Experiments were carried out to determine the coefficient of friction according to the method of state standards on a tensile testing machine MIRC-1000K. Samples of a round shape made of polymeric membranes were

studied on a special multiaxial stretching device in accordance with the requirements of state standards. **Result.** Multiaxial tensile testing of LOGICBASE™ V-SL polymeric membranes revealed that the maximum tensile strength of the samples was 6948.22 kPa (~ 6.95 MPa), and the elongation of the samples at break was 113.89%. The coefficient of friction in the system "polymer waterproofing material - concrete structure" was determined under conditions of increased seismic activity according to the MSK-64 scale. **Conclusion.** According to the studies, it was concluded that PVC membranes for engineering waterproofing can be used in construction areas with seismicity up to 9 points inclusive on the MSK-64 scale.

Keywords: friction, membrane, waterproofing, seismic zone

For citation: V.N. Shalimov, A.V. Tsybenko, I.N. Goglev, S.A. Loginova. Study of work of PVC membranes for engineering waterproofing under increased seismic conditions. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science. 2023; 50 (1):229-237. DOI: 10.21822 /2073-6185-2023-50-1-229-237

Введение. Для территории Российской Федерации характерно большое разнообразие ландшафтов, часовых и климатических поясов. Свыше четверти территории Российской Федерации подвержено сейсмическим воздействиям [1-3]. Например, Саяны, Байкал, Сахалин, Курильские острова и др. [2]. Согласно СП 14.13330.2018, Приложение А, карты сейсмического районирования (ОСР-2015-А, В), сейсмическая активность, например, на Курильских островах составляет 10 баллов по шкале MSK-64. Строительство в таких зонах требует максимальной надежности и высокой прочности от применяемых строительных материалов и изделий [2, 3]. Для объектов класса КС-3[4] любого строительства подбор качественных материалов на этапе проектирования также предусмотрен нормативными документами. Например, при строительстве зданий и сооружений повышенного уровня ответственности, для которых, согласно ГОСТ 27751-2014 п.3.7, отсутствуют апробированные решения (в том числе и в области гидроизоляции), необходимо использовать данные экспериментальных исследований на моделях или натурных конструкциях [5,6]. Расчет конструкций и оснований для таких сооружений рекомендуется выполнять на основе специальных теоретических и апробированных численных и экспериментальных исследований, проводимых на натурных моделях [5-8].

К гидроизоляционному материалу, применяемому в таких зонах строительства, предъявляются следующие требования: повышенная прочность на растяжение, высокие характеристики относительного удлинения, а также способность восприятия различных многоосевых нагрузок [9,10]. К таким материалам, безусловно, относятся полимерные (ПВХ) мембраны для инженерной гидроизоляции [9,10]. Особенно это актуально в зонах деформационных швов зданий, поскольку именно там возникают многоосные растягивающие нагрузки, например, продольный сдвиг.

Постановка задачи. При использовании гидроизоляционного материала в подобных условиях возникает трение материала о стенки бетонных (железобетонных) конструкций фундаментных зон. Возникающие многоосные растягивающие нагрузки позволяют оценить работу материала, направленную на обеспечение целостности и долговечности бетонных и железобетонных конструкций при воздействии подземных вод. В случае повреждения гидроизоляции может начаться процесс коррозии бетона или железобетона [11-13], сопряженный с рядом рисков. В связи с этим, актуальны исследования работы гидроизоляционных ПВХ-мембран на многоосное растяжение, а также исследования на сдвиг и опрокидывание здания в условиях повышенной сейсмической активности.

Методы исследования. Испытания проводились в соответствии с требованиями государственных стандартов. Экспериментальная часть №1. Испытание полимерных мембран на многоосное растяжение.

ГОСТ 33067-2014 «Материалы геосинтетические для тоннелей и подземных сооружений. Общие технические требования» содержит раздел по определению прочности при многоосном растяжении для материалов, применяемых для гидроизоляции тоннелей и

подземных сооружений, что связано с большим количеством деформационных узлов и швов в габаритных сооружениях.

Испытания выполнялись в соответствии с методикой ГОСТ 33067-2014, Приложение ДВ (актуализированная и переведенная редакция европейского стандарта EN 14151:2010 «Геосинтетики. Определение прочности при разрыве»). Объектами исследования служили образцы круглой формы (диаметром 200 ± 2 мм), выполненные из полимерной мембраны LOGICBASE™V-SL (мембрана толщиной 2 мм с сигнальным слоем). Лицевая поверхность образцов предварительно была очищена и не имела видимых дефектов.

Образцы находились в условиях кондиционирования до постоянной массы при относительной влажности воздуха $(65 \pm 5)\%$ и температуре $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$. В общем виде установка представлена на рис. 1.



Рис. 1. Общий вид испытательной установки

Fig. 1. Main view of the test facility

Состав испытательного оборудования приведен на рис. 2.

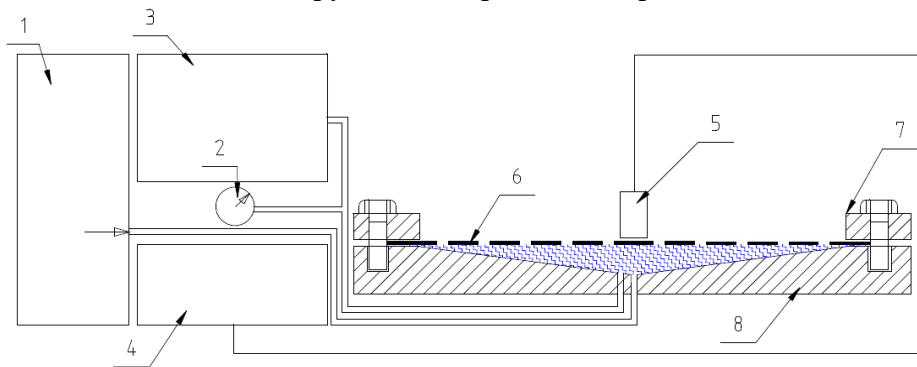


Рис. 2. Принципиальная схема испытательной установки на многоосное растяжение: 1 – подача воды с заданным расходом; 2 – манометр; 3 – электронный датчик давления; 4 – автоматизированный комплекс управления (компьютер); 5 – датчик перемещения; 6 – тестируемый образец; 7 – зажимное кольцо; 8 – основание испытательной камеры

Fig. 2. Schematic diagram of a multiaxial tension test facility: 1- water supply with a specified flow rate; 2 - pressure gauge; 3 – electronic pressure sensor; 4 – automated control system (computer); 5 – displacement sensor; 6 – test sample; 7 – clamping ring; 8 – base of the test chamber

Испытательная камера состоит из основания и зажимных колец внутренним диаметром (200 ± 2) мм, что соответствует размеру образцов для испытаний. Нижний внутренний край зажимных колец имеет радиус закругления 3 мм. Температура жидкости должна поддерживаться в течение всего испытания на уровне $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$.

Образцы укладывались на опорную поверхность испытательной камеры сигнальным слоем вверх, тыльной стороной черного цвета – к основанию. Основание испытательной камеры имеет конусовидную форму, поэтому для плотного прилегания к нему образцов оно заполнялось водой через впускное отверстие. К испытуемым образцам ступенчато прикладывалось гидравлическое давление до момента разрыва, а во время прове-

дения испытаний фиксировались гидравлическое давление под образцом для испытания и деформация образца для испытания. Образцы для испытания закреплялись в зажимных кольцах испытательной камеры с помощью прижима верхнего кольца (болтовым соединением на обечайке установки) для защиты их от проскальзывания во время испытаний. В центр испытательных образцов устанавливалось устройство для измерения прогиба. Далее к каждому образцу прикладывалось гидравлическое давление. Скорость потока жидкости при этом составляла 3 см/с. Образцов, сместившихся при испытании или разорвавшихся у кромок зажимных колец, зафиксировано не было.

Экспериментальная часть №2. Определение коэффициента трения полимерных мембран.

Для определения коэффициента трения использовалась разрывная машина МИРК-1000К, предназначенная для статических испытаний образцов стальных канатов и изделий из них (рис. 3). Технические характеристики машины: наибольшая номинальная нагрузка – 1000 кН; цена деления единицы наименьшего разряда динамометра – 0,02 кН; ширина рабочего пространства – 450 мм; габаритные размеры – 3000х900х600 мм.

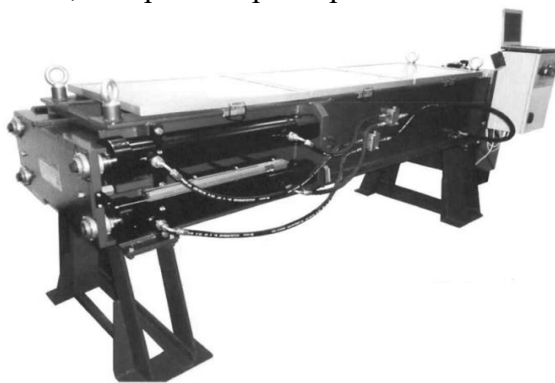


Рис. 3. Разрывная машина МИРК-1000К

Fig. 3. Bursting machine MIRK -1000K

Испытательный образец заделывался согласно требованиям ГОСТ Р 58753-2019 (Приложение В) и устанавливался в захватные устройства [14-16], одно из которых установлено на подвижной траверсе, а другое выполнено неподвижным. Для давлений от 0,1-0,3 МПа использовался динамометр фирмы Tidemann с максимальным усилием растяжения до 1 кН, для давлений 0,4-0,9 МПа - динамометр ДПУ-5 с максимальным усилием растяжения до 5 кН.

Между бетонными поверхностями укладывался гидроизоляционный ковер размером 200х400мм, состоящий из 2-х слоев геотекстильного материала, между которыми располагалась полимерная ПВХ-мембрана LOGICBASE™ марки V-SL. Для подстилающего и разделительного слоев в гидроизоляционном ковре использовался иглопробивной термообработанный полипропиленовый геотекстиль плотностью 300÷500 г/м².

Бетонные образцы вместе с гидроизоляционным ковром и держателями устанавливались на машину, после чего к ним прикладывалось усилие, обеспечивающее создание удельной нагрузки 0,1÷1,0 МПа, после чего начинался процесс проведения испытания. В процессе возникающего перемещения измерялась сила трения. Измерение силы трения проводится каждые 5 минут после начала испытания, а само испытание считалось законченным по достижению постоянной силы трения, но не ранее чем через 25±5 минут после начала испытания.

Обсуждение результатов. Экспериментальная часть №1. Испытание полимерных мембран на многоосное растяжение. Специфика работы деформационных швов в конструкциях подразумевает под собой наличие большого количества разнонаправленных растягивающих и сдвигающих нагрузок [10,17,18], которые могут возникнуть в ходе сейсмических воздействий. Классические испытания полимерных мембран на растяжение [9] проводятся отдельно для образцов в продольном и поперечном направлении и на самом

деле не позволяют максимально приблизить условия работы гидроизоляционного материала к работе реальных деформационных швов.

Ниже представлены результаты испытаний для полимерного рулонного гидроизоляционного материала LOGICBASE™ V-SL по определению прочности при разрыве, выполненных на базе лаборатории ООО «ВНИИСТРОМ-НВ» (рис. 4, а, б; табл.1).

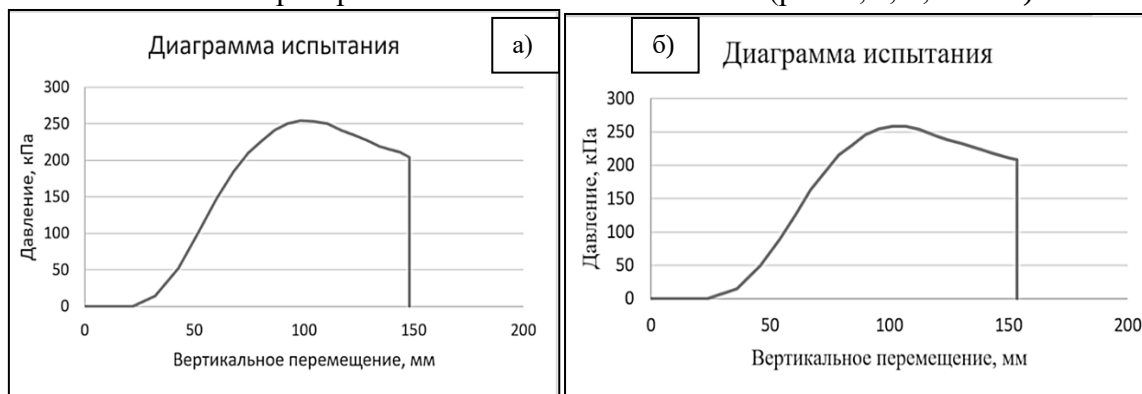


Рис. 4.а), б) Графики гидравлического давления и соответствующие ему деформации образцов

Fig. 4. a), b) Graphs of hydraulic pressure and corresponding deformations of samples

Таблица 1. Результаты испытаний по определению прочности при многоосном растяжении ПВХ мембран LOGICBASE™
Table 1. Test results to determine the multiaxial tensile strength of LOGICBASE™ PVC membranes

№	Определяемые показатели испытываемой продукции Determined indicators of tested products	Единица измерения Unit	Обозначение нормативной документации на методы испытаний Designation of regulatory documentation for test methods	Условия испытаний Test conditions	Результаты Results
1	Прочности при разрыве Tensile strength	кПа	ГОСТ 33067-2014 приложение ДВ	t = 22,2 °C, W = 46,8 %	среднее: 5591,22 average
2	Максимальная прочность Maximum strength	кПа	ГОСТ 33067-2014 приложение ДВ	t = 22,2 °C, W = 46,8 %	среднее: 6948,22 average
3	Деформацию образца при разрыве Deformation of the sample at break	%	ГОСТ 33067-2014 приложение ДВ	t = 22,2 °C, W = 46,8 %	среднее: 113,89 average

Выполненные испытания наглядно демонстрируют высокую эластичность мембран LOGICBASE™ одновременно с их высокой прочностью. Материал равномерно воспринимает растягивающую многоосную нагрузку и пропорционально удлиняется с ее ростом до разрыва. Такой нелинейный характер разрушения образца свидетельствует о высокой изотропии материала, т.е. его прочность при воздействии многоосной нагрузки сохраняется в неизменном виде, без зависимости от направления приложения нагрузки. Отсутствие в материале зоны пониженной прочности значительно снижает риск возникновения разрыва гидроизоляционного материала в процессе его эксплуатации.

Экспериментальная часть №2. Определение коэффициента трения полимерных мембран. В табл. 2 представлены результаты испытаний на определение коэффициента трения в системе «полимерный гидроизоляционный материал - бетонная конструкция».

Таблица 2. Результаты экспериментов по определению коэффициента трения ПВХ мембраны о бетонную поверхность

Table 2. Results of experiments to determine the coefficient of friction of a PVC membrane on a concrete surface

Масса пригруза, т, кг Weight	Площадь опирания, S,см ² Support area	Давление на опорную поверхность, Р, МПа Ground pressure	Показания динамометра, F, кг Indications dynamometer	Коэффициент трения, μ Friction coefficient
для давлений от 0,1 до 0,3 МПа – бетонная призма размерами 5х18х10 см; динамометр до 100кг for pressures from 0.1 to 0.3 MPa - a concrete prism with dimensions of 5x18x10 cm; dynamometer up to 100 kg				
97	90	0,106	30	0,309
			31	0,32
			32	0,33
172	90	0,187	54	0,314
			56	0,326
			59	0,343
207	90	0,226	71	0,343
			73	0,353
			75	0,362
278	90	0,303	91	0,327
			93	0,335
			95	0,342
для давлений от 0,4 до 1,0 МПа – бетонный кубик размером 5х5х5 см; динамометр до 1000 кг for pressures from 0.4 to 1.0 MPa - a concrete cube measuring 5x5x5 cm; dynamometer up to 1000 kg				
100	25	0,4	32,6	0,326
			33,6	0,336
			35,4	0,354
156	25	0,624	36,1	0,282
			45,9	0,359
			49,5	0,387
210	25	0,84	70,68	0,337
			73,14	0,348
			77,2	0,368
255	25	1,02	86,1	0,338
			90,61	0,355
			101,66	0,399

На рис. 5 показан график динамики изменения коэффициента трения в зависимости от величины давления на гидроизоляционный пакет.

Для моделирования процесса опрокидывания в условиях сейсмических активностей была рассмотрена упрощенная классическая модель. С точки зрения сопротивления материалов теоретическая модель такого процесса выглядит следующим образом [15-19]: брусок с привязанной к длинной грани нитью устанавливается торцом на горизонтальную поверхность стола. Если нить закреплена невысоко над поверхностью стола, то при потягивании нити брусок будет скользить (и в случае большой высоты закрепления нити, брусок может просто опрокинуться с минимальным скольжением).

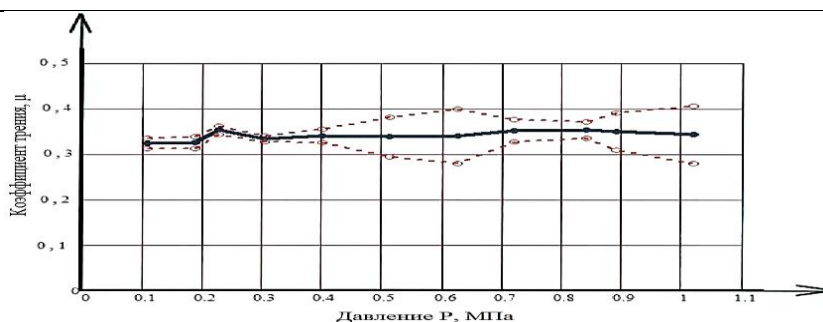


Рис. 5. График динамики изменения коэффициента трения в зависимости от давления на гидроизоляционный пакет

Fig. 5. Graph of the dynamics of the change in the coefficient of friction depending on the pressure on the waterproofing package

При определенной высоте h точки A крепления нити сила натяжения нити F опрокидывает брусок (рис.6).

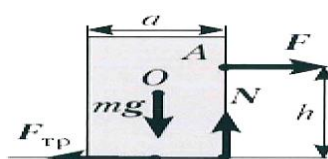


Рис. 6. Брусок и действующие на него усилия

Fig. 6. The bar and the forces acting on it

Условия равновесия для этого случая относительно точки – угла опрокидывания выглядят следующим образом:

$$Fh - mga/2 = 0 \quad (1)$$

$$F - F_{\text{тр}} = 0 \quad (2)$$

$$N - mg = 0 \quad (3)$$

В тоже время известно, что

$$F_{\text{тр}} = \mu N \quad (4)$$

В результате:

$$\mu = \frac{a}{2h} \quad (5)$$

Сдвиг здания как полноценной системы произойдет при условии $F_{\text{тр}} = \mu N < A mg$, где $A=0,1; 0,2$ или $0,4$ при сейсмичности площадки 7, 8 и 9 баллов (см. СП 14.13330.2018) соответственно [16-20]. Таким образом, при условии $\mu > A$ опрокидывания не произойдет при данных показателях сейсмичности.

Вывод. В результате исследований было установлено, что коэффициент трения ПВХ-мембран не превышал $\mu=0,4$. Данная величина « μ » удовлетворяет устойчивому состоянию здания, исключающему опрокидывание при сейсмичности площадки 7,8 и 9 баллов. Также исследования показали высокую эластичность гидроизоляционных ПВХ-мембран, что обеспечивает высокую прочность на многоосное растяжение и высокие показатели относительного удлинения. Расчет коэффициента трения и численное моделирование процесса опрокидывания здания с гидроизоляцией из мембран LOGICBASE™ показали, что они могут успешно применяться в зонах с сейсмичностью до 9 баллов включительно.

Библиографический список:

1. 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.
2. Аминтаев, Г.Ш. Сейсмическая безопасность – цель, сейсмостойкость сооружений - средство // Инженерные изыскания. - 2014. - № 2. - С. 48-53.
3. Пузанков, Ю.И. Сейсmobезопасность зданий и сооружений / Ю.И. Пузанков, А.А. Хорошев, Г.Ю. Чариков // Электронный сетевой политематический журнал «Научные труды КубГТУ». - 2020. - № 8. - С. 123-133.

4. 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.
5. Травуш, В.И. О параметрической (Performance Based) 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.
6. Еременко, Д.Б. Технический регламент как источник объективных требований к применяемым материалам (в порядке обсуждения) // Промышленное и гражданское строительство. - 2015. - № 11. - С. 57-62.
7. 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.
8. Ершов, Г.А. Нормативное обеспечение терминологии в области надежности. Хорошо или плохо ГОСТ 27751-2014? / Г.А. Ершов, В.Н. Семериков, Н.В. Семериков, Ю.И. Тарасьев // Стандарты и качество. - 2023. - № 2. - С. 37-41.
9. 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.
10. Цыбенко, А.В. Многоосное растяжение полимерного рулонного гидроизоляционного материала. Определение прочности при разрыве // Фундаменты. - 2022. - № 3(9). - С.55-57.
11. Румянцева, В.Е. Применение полевых и лабораторных методов определения карбонизации, хлоридной и сульфатной коррозии при обследовании строительных конструкций зданий и сооружений / В.Е. Румянцева, И.Н. Гоглев, С.А. Логинова // Строительство и техногенная безопасность. - 2019. - № 15(67). - С. 51-58.
12. 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.
13. Логинова, С.А. Индикаторные способы определения долговечности железобетонных конструкций при их обследовании / С.А. Логинова, И.Н. Гоглев // Строительство и техногенная безопасность. - 2022. - № S1. - С. 119-126.
14. Загородникова, М.А. Определение статического коэффициента трения ПВХ-мембраны в зоне контакта при гидроизоляции железобетонного фундамента / М.А. Загородникова, В.П. Ярцев // Кровельные и изоляционные материалы. - 2017. - № 4. - С. 30-33.
15. Бартенев, Г.М. Трение и износ полимеров / Г.М. Бартенев, В.В. Лаврентьев. -Л.: Химия. 1972. - 240 с.
16. Mailyan, L. R. Seismic resistance evaluation of high-rising structures under ductility level earthquake by nonlinear static method / L. R. Mailyan, M. A. Zubritskiy, O. Y. Ushakov, L. S. Sabitov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. 913(3), [032064]. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/913/3/032064>
17. Симбиркин, В.Н. Учет указаний СП 14.13330.2018 при реализации расчета сооружений на сейсмические воздействия в программном комплексе STARK ES / В.Н. Симбиркин, Ю.В. Панасенко // Вестник НИЦ Строительство. - 2019. - № 2 (21). - С. 103-113.
18. Соколов, Н.С. Длительные исследования процессов деформирования оснований фундаментов при повышенных нагрузках // Жилищное строительство. - 2018. - № 5. - С. 3-8.
19. Джинчелашвили, Г.А. Определение коэффициента трения на уровне материала рулонного полимерного гидроизоляционного LOGICROOFT-SL // Научно-технический отчет, 2015. - 18 с.
20. Minhao, Wu. Study on Seismic Resistance and Isolation Method of Concrete Frame Structure //IOP Conference Series Earth and Environmental Science. 2021. 638(1):012045

References:

1. Bobrov, I.M. Design and construction of buildings and structures in seismic areas. I.M. Bobrov, I.N. Segayev. *Alley of Science*. 2018; 4 (20): 230-233.
2. Amintaev, G.Sh. Seismic safety is the goal, seismic resistance of structures is a means. *Engineering surveys*. 2014;2: 48-53.[In Russ]
3. Puzankov Yu.I., A.A. Khoroshev, G.Yu. Charikov. Seismic safety of buildings and structures. *Electronic network polythematic journal "Scientific works of KubGTU"*. 2020; 8:123-133. [In Russ]
4. Klovsky A.V., O.V. Mareeva. Features of the design of objects of a high level of responsibility with boundary values of the seismicity of the construction site. *Nature arrangement*. 2018;3:63-69. [In Russ]
5. Travush, V.I. About the parametric (Performance Based) model of regulation 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. [In Russ]

6. Eremenko, D.B. Technical regulations as a source of objective requirements for the materials used (in order of discussion). *Industrial and civil construction*. 2015; 11: 57-62. [In Russ]
7. Lebedeva I.V. Problems of rating the reliability of building structures and expert activity in the field of international standardization. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy*. 2022; 2 (301): 39-46. [In Russ]
8. Ershov, G.A. Normative provision of terminology in the field of reliability. Good or bad GOST 27751-2014? / G.A. Ershov, V.N. Semerikov, N.V. Semerikov, Yu.I. Tarasiev. *Standards and quality*. 2023; 2: 37-41. [In Russ]
9. Shalimov, V.N. Investigation of the consumption of injection compounds in repairable systems for waterproofing foundations / V.N. Shalimov, A.V. Tsybenko, I.N. Goglev. *Smart composites in construction*. 2022; 3 (2): 29-44. [In Russ]
10. Tsybenko, A.V. Multiaxial stretching of a polymeric rolled waterproofing material. Determination of tensile strength. *Fundamentals*. 2022; 3(9):55-57. [In Russ]
11. Rummyantseva, V.E. Application of field and laboratory methods for determining carbonization, chloride and sulfate corrosion during the survey of building structures of buildings and structures / V.E. Rummyantseva, I.N. Goglev, S.A. Loginova. *Construction and technogenic safety*. 2019; 15(67):51-58. [In Russ]
12. Fedosov, S.V. Identification of sulfate and chloride corrosion of concrete at the field and laboratory stages of inspection of building structures of buildings and structures / S.V. Fedosov, V.N. Fedoseev, S.A. Loginova, I.N. Goglev. *BST: Bulletin of construction equipment*. 2021;10 (1046): 29-31. [In Russ]
13. Loginova S.A., I.N. Goglev. Indicator methods for determining the durability of reinforced concrete structures during their examination. *Construction and technogenic safety*. 2022; 1:119-126. [In Russ]
14. Zagorodnikova, M.A. Determination of the static coefficient of friction of a PVC membrane in the contact zone during waterproofing of a reinforced concrete foundation / M.A. Zagorodnikova, V.P. Yartsev. *Roofing and insulation materials*. 2017; 4: 30-33. [In Russ]
15. Bartenev G.M., V.V. Lavrentiev. Friction and wear of polymers, L.: *Chemistry*. 1972; 240. [In Russ]
16. Mailyan, L. R. Seismic resistance evaluation of high-rising structures under ductility level earthquake by non-linear static method / L. R. Mailyan, M. A. Zubritskiy, O. Y. Ushakov, L. S. Sabitov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. 913(3), [032064]. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/913/3/032064>[In Russ]
17. Simbirkin, V.N. Taking into account the instructions of SP 14.13330.2018 when implementing the calculation of structures for seismic effects in the STARK ES software package / V.N. Simbirkin, Yu.V. Panasenkov. *Bulletin of the Research Center for Construction*. 2019; 2 (21):103-113.
18. Sokolov, N.S. Long-term studies of the processes of deformation of foundation foundations under increased loads. *Zhilishchnoe stroitel'stvo*. 2018;5:3-8. [In Russ]
19. Jinchelashvili, G.A. Determination of the coefficient of friction at the level of the material of the rolled polymeric waterproofing LOGICROOFT-SL. *Scientific and technical report*, 2015; 18. [In Russ]
20. Minhao, Wu. Study on Seismic Resistance and Isolation Method of Concrete Frame Structure //IOP Conference Series Earth and Environmental Science. 2021.638(1):012045

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; sl79066171227@yandex.ru

Information about authors:

Shalimov Vladimir Nikolaevich, candidate of technical sciences, head of the technical service of the direction "Polymer membranes and PIR"; prc@tn.ru

Tsybenko Aleksey Vasilievich, head of the technical service of the direction "Engineering waterproofing"; prc@tn.ru

Goglev Ilya Nikolaevich, technical specialist of the direction "Engineering waterproofing and PLANTER"; 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 04.02.2023

Одобрена после рецензирования/ Revised 27.02.2023.

Принята в печать/Accepted for publication 27.02.2023.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 624.011

DOI: 10.21822/2073-6185-2023-50-1-238-244

Оригинальная статья / Original Paper

Пространственные большепролетные конструкции

А.К. Юсупов, Х.М. Муселемов, Р.И. Вишталов

Дагестанский государственный технический университет,
367026 г. Махачкала, пр. И.Шамиля, 70, Россия

Резюме. Цель. В данной статье рассматриваются пространственные большепролетные конструкции, приводятся особенности их работы, а также примеры компоновки. Даются генеральные размеры и способы стабилизации перемещений. **Метод.** Приводятся особенности работы и компоновки пространственных большепролетных конструкций, а также расчётные формулы. Представлены виды сечений и узлы сопряжения элементов. Излагается методика, позволяющая стабилизировать перемещения большепролетных покрытий. **Результат.** Приведенные конструктивные схемы, а также анализ их работы позволяют проектировать большепролетные пространственные системы в виде выпуклых и вогнутых конструкций, которые обладают высокой надёжностью, минимальным весом, а также высокой технологичностью при изготовлении, транспортировке и монтаже. **Вывод.** Предложенные рациональные конструктивные решения позволяют уменьшить собственный вес пространственных выпуклых и вогнутых покрытий, обладающих необходимой жёсткостью, прочностью и устойчивостью. Рассмотренные в статье виды конструктивных схем, сечения и узлы сопряжения элементов находят широкое применение в практике проектирования и строительства.

Ключевые слова: пространственные конструкции, выпуклые и вогнутые конструкции, вантовые и мембранные покрытия, распорные системы, надёжность, узлы, сечения

Для цитирования: А.К. Юсупов, Х.М. Муселемов, Р.И. Вишталов. Пространственные большепролетные конструкции. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023; 50 (1):238-244. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-1-238-244

Spatial large-span structures

A.K. Yusupov, H.M. Muselemov, R.I. Vishtalov

Daghestan State Technical University,
70 I. Shamiya Ave., Makhachkala 367026, Russia

Abstract. Objective. This article discusses spatial large-span structures, provides features of their work, as well as layout examples. General dimensions and ways of stabilizing displacements are given. **Method.** The features of the work and layout of spatial large-span structures, as well as calculation formulas are given. The types of sections and nodes of conjugation of elements are presented. A technique is described that allows stabilizing the movements of large-span pavements. **Result.** The given structural schemes, as well as the analysis of their work, allow designing large-span spatial systems in the form of convex and concave structures that have high reliability, minimal weight, and high manufacturability in manufacturing, transportation and installation. **Conclusion.** The proposed rational design solutions make it possible to reduce the own weight of spatial convex and concave coatings, which have the necessary rigidity, strength and stability. The types of structural schemes, sections and junctions of elements considered in the article are widely used in the practice of design and construction.

Keywords: spatial structures, convex and concave structures, cable-stayed and membrane coatings, spacer systems, reliability, knots, sections

For citation: A.K. Yusupov, Kh.M. Muselemov, R.I. Vishtalov. Spatial large-span structures. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2023; 50(1): 238-244. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-1-238-244.

Введение. С целью уменьшения пролетного изгибающего момента покрытия большепролетных зданий выполняют выпуклыми вверх или вогнутыми вниз [1,2]. При этом на опорах возникают распоры H , от которых в середине пролета развиваются моменты обратного знака к моментам от внешней нагрузки q [9].

Постановка задачи. На рис. 1 а. дается схема выпуклой конструкции. Конструкция работает на сжатие с изгибом. Поэтому она подвержена к потере устойчивости. Другими словами, в выпуклых конструкциях возникает проблема устойчивости. Для обеспечения устойчивости обычно применяют различные конструктивные приемы: решетчатые сечения арки или рамы, переменность сечения по пролету, увеличения высоты сечения ригеля, применение сталей повышенной прочности или алюминиевых сплавов [6-8] и т.д. Выпуклые конструкции, имея распор H , обладают способностью уменьшать пролетные изгибающие моменты, но при этом возникает проблема потери устойчивости.

На рис. 1 б. показана схема вогнутой конструкции. Здесь висячая конструкция устойчива. Другими словами, здесь нет проблемы устойчивости. Однако есть здесь другая проблема: возникают большие вертикальные перемещения, то есть проблема стабилизации прогибов. Эта проблема решается тремя конструктивными приемами:

1. Предварительное напряжение конструкций;
2. Применение вместо гибких нитей жестких;
3. Придание поверхности вогнутой оболочки двоякой кривизны, особенно поверхности с положительной и отрицательной кривизной.

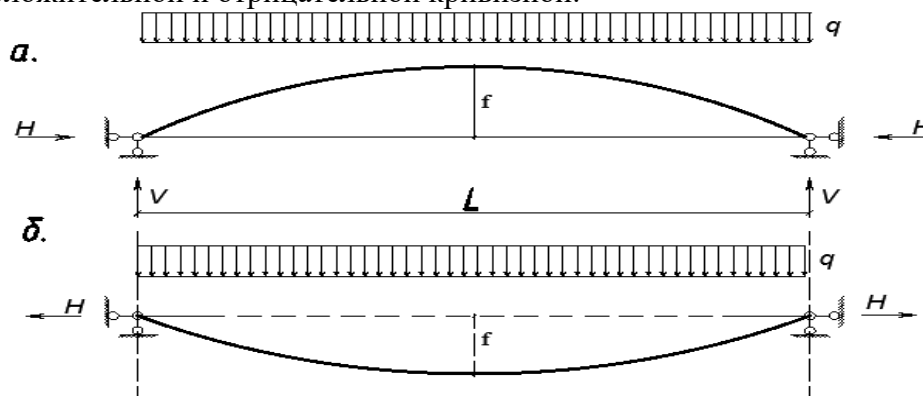


Рис. 1. Расчётные схемы выпуклых и вогнутых конструкций: а-выпуклые арочные конструкции или цилиндрические оболочки; б-вогнутые висячие конструкции или цилиндрические оболочки.

Fig.1. Design schemes for convex and concave structures: a-convex arch structures or cylindrical shells; b-concave hanging structures or cylindrical shells

Из рис.1 а., следует, что изгибающие моменты в середине пролёта

$$M_0 = M_6 - H \cdot f \quad (1)$$

или

$$M_0 = \frac{q \cdot L^2}{8} - H \cdot f. \quad (2)$$

В висячих конструкциях (рисунок-1 б.) $M_0 = 0$. Поэтому из равенства (2) следует $\frac{q \cdot L^2}{8} - H \cdot f = 0$. Отсюда распор

$$H = \frac{q \cdot L^2}{8 \cdot f}. \quad (3)$$

Выпуклые конструкции (арки) рациональны на пролетах 120÷180 м. А вогнутые конструкции рациональны (поскольку они работают на растяжении) на пролетах 120 и выше. Верхний предел пролета здесь ограничивается расчетными сопротивлениями растянутых несущих элементов вогнутого покрытия.

Методы исследования. Перемещения поверхности висячих покрытий, как было указано выше, можно стабилизировать тремя конструктивными приемами: предварительным напряжением висячих элементов; путем применения вместо гибких нитей жестких [3,4]; с помощью придания поверхности кривизны - отрицательной в одном направлении и положительной в другом (седловидные покрытия).

В качестве примера приведем вантовое седловидное покрытие, рис. 2. Здесь даются разрез и план вантового седловидного покрытия (США). На рис. 2 все размеры даны в метрах. Здесь две наклонные арки опираются на вертикальные колонны. Эти арки играют роль опорного контура. На этот контур подвешиваются ванты (канаты). Стабилизация перемещений седловидного покрытия обеспечивается за счет предварительного напряжения вант, идущих поверх несущих вант. На рис. 2 б. ванты, с помощью которых предварительно напрягаются несущие ванты, идут в поперечном направлении. Каждая ванта с помощью домкратов предварительно натягивается, тем самым стабилизируются перемещения покрытия.

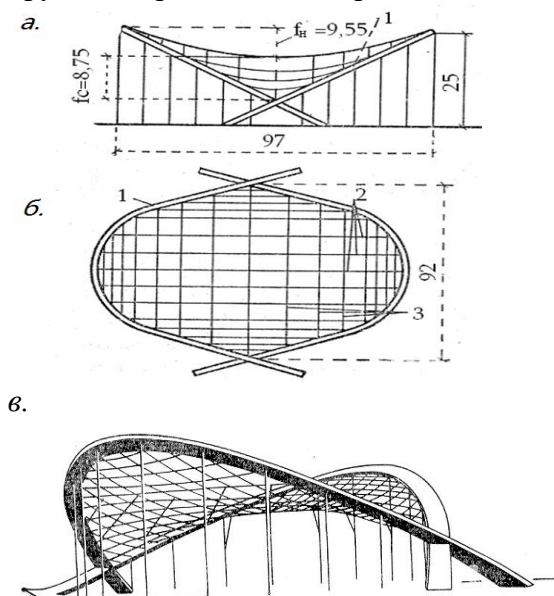


Рис.2. Вантовое седловидное покрытие Рэлей-арена: а-разрез, б-план, в-аксонометрия 1 – железобетонные арки; 2 – несущие тросы диаметром 32мм через 1,83м; 3 – стабилизирующие тросы диаметром 19мм через 1,83м.

Fig.2. Cable-stayed saddle roof of the Rayleigh Arena: a - section, b - plan, c - axonometry 1 - reinforced concrete arches; 2 - carrying cables with a diameter of 32 mm through 1.83; 3-stabilizing cables with a diameter of 19 mm through 1.83 m.

В последнее время находят широкое применение мембранные покрытия [11]. Оболочка перекрытия представляет собой тонкий стальной лист толщиной в 1 мм [5,11]. Стабилизация перемещений здесь обеспечивается путем придания поверхности двоякой кривизны. Мембранные покрытия относятся к легким покрытиям [4,5] они, обладая легкостью и архитектурной выразительностью, одновременно обладают большим недостатком: мембраны боятся коррозии, которая вызывает у них нарушение сплошности, то есть пробивают отверстия (ржавчина легко съедает лист толщиной в 1 мм).

Образование отверстия приводит к концентрации напряжений, которые охрупчивают сталь, поэтому вызывают внезапное нарушение мембранного покрытия. По этой причине необходимо во время эксплуатации постоянно покрывать поверхность мембраны коррозионно-защитными красками. Были случаи обрушения мембранных покрытия из-за появления влаги на поверхности мембраны, которые привели к ржавчине, соответственно

к образованию отверстий и концентрации напряжений (лаборатория в ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко). Приведём пример мембранного покрытия на рис. 3.

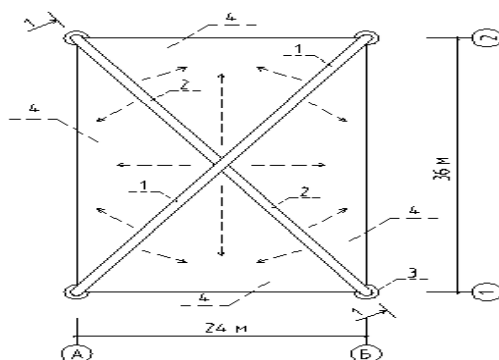


Рис.3. План городошника с мембранным покрытием в стадионе «Динамо»

Fig.3. Plan of a membrane-coated gorodoshnik in the Dynamo stadium

На рис. 3: 1 и 2 – две перекрестные в плане арки трубчатого сечения образуют опорный контур мембранного покрытия; 3 – оголовок (капитель) колонны трубчатого сечения; 4 – висячая оболочка в виде мембраны из металлических листов толщиной в 1 мм; пунктирными стрелками показаны направления стекания воды по поверхности мембранной оболочки, по этим стрелкам можно видеть, как меняется кривизна мембранной оболочки. Именно эта кривизна обеспечивает стабилизацию перемещений покрытия. Все элементы сооружения, кроме фундаментов, из металла; две перекрестные в плане арки и мембрана в целом были скомпонованы и собраны на земле, затем были подняты с помощью гидравлических домкратов и установлены на заранее возведенные четыре колонны. Распор арок воспринимается самой мембраной. «Геометрия» арки представляет собой безмоментный контур при воздействии постоянных нагрузок.

Мембранные висячие оболочки имеют небольшой вес, рациональны в пролетах 20÷60(м).

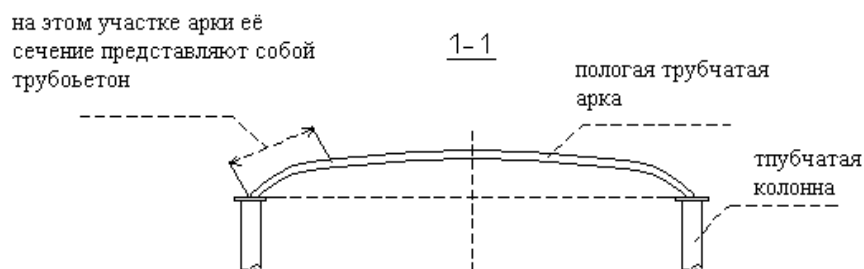


Рис.4. Разрез 1-1, по плану рис.3

Fig.4. Section 1-1, according to the plan of Fi.3

Здесь реализуется принцип лука и тетивы. Роль лука играют арки, а роль тетивы – висячая оболочка – мембрана. Вместо мембраны на перекрестные арки можно подвесить сетки из вант. В этом случае в качестве вант может служить высокопрочная арматура, полосовая сталь, канаты. Поверх вантовой сетки укладываются железобетонные или армоцементные плиты.

На рис. 5 дана аксонометрия городошника с мембранным покрытием. Здесь пунктирными стрелками показаны направления стока воды. Это сооружение было построено на стадионе Динамо в Москве в 1970 году. Стальной висячий лист работает на растяжение и сдвиг в своей плоскости. Жесткость покрытия достигается за счет геометрии поверхности: двоякая кривизна покрытия стабилизирует деформации и обеспечивает естественный водоотвод. Здесь мембрана играет роль тетивы, а арки – лука. Такое натяжение мембраны и двоякая кривизна ее поверхности обеспечивают стабилизацию прогибов покрытия.

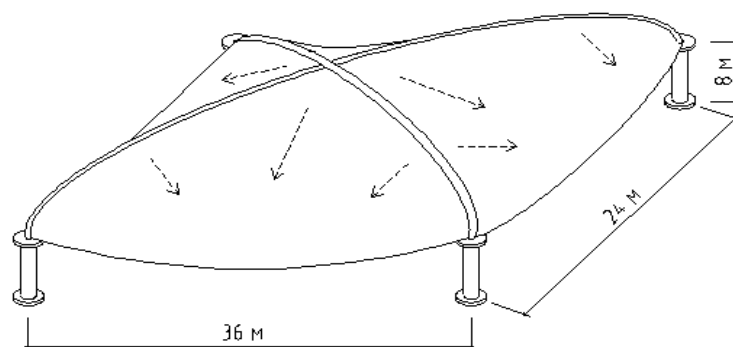


Рис. 5. Аксонометрия городошника с мембранным покрытием в стадионе «Динамо»
Fig. 5. Axonometry of a gorodoshnik with a membrane coating in the Dynamo stadium

Обсуждение результатов. Далее приведем ещё два примера большепролетного покрытия. На рис. 6 даются план и разрез мембранного большепролетного покрытия. Мембранная оболочка лежит на жестких нитях, которые идут с определенной кривизной, образуя тем самым оболочку с двоякой кривизной. Это обеспечивает стабилизацию перемещений мембраны. Направляющие полосы здесь играют роль жестких нитей. На объектах олимпийской деревни в Москве широко применялся этот конструктивный прием: растянутые элементы которые работают на растяжении конструировались в виде жестких нитей.

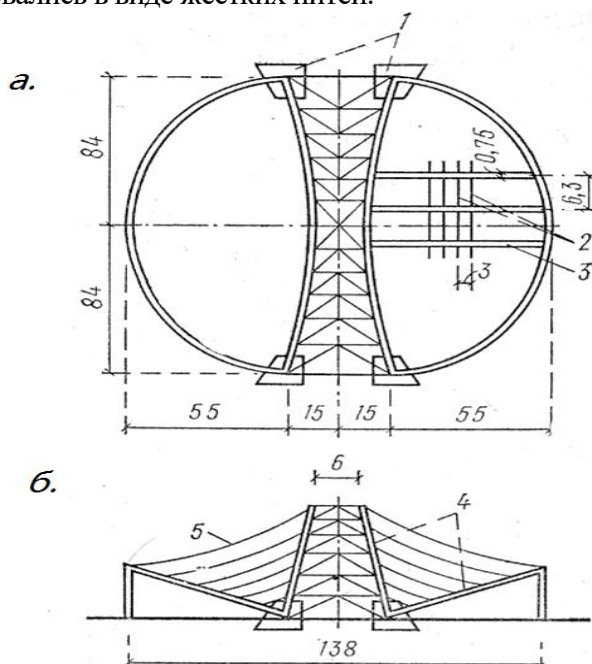


Рис. 6. Велотрек в Крылатском (Москва)

1 – железобетонные опоры; 2– направляющие швеллеры; 3 – направляющие полосы 50x60мм; 4 – металлические арки; 5 – мембрана (t = 4 мм)

Fig. 6. Cycling track in Krylatskoye (Moscow)

1 - reinforced concrete supports; 2 - guide channels; 3 - guide strips 50x60mm; 4 - metal arches; 5 - membrane (t = 4 mm)

Приведём еще один пример [1,12], в котором покажем конструктивный прием предварительного напряжения вантовой сетчатой седловидной оболочки.

Одним из эффективных и технологичных способов преднапряжения несущих и стабилизирующих вант является метод опускания опор.

На рис.7 даётся план вантовой седловидной сетчатой оболочки. Железобетонный контур вантового покрытия опирается на колонны (рис.8). Для наглядности стабилизирующие ванты на левой половине покрытия условно не показаны (рис.7); А, Б, С, Д – опоры (см. план и аксонометрию). Пунктирными линиями показаны стабилизирующие ванты, сплошными – несущие. Стабилизирующие ванты натягивают поверх несущих.

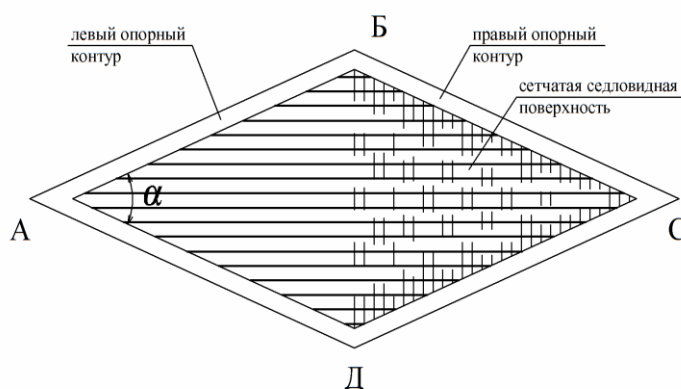


Рис. 7. Схема расположения вант и опорного контура в плане
 Угол α – произвольный, в частном случае $\alpha = 90^\circ$
Fig. 7. Schematic of the location of the stays and the support contour in plan
 Angle α is arbitrary, in a particular case $\alpha = 90^\circ$

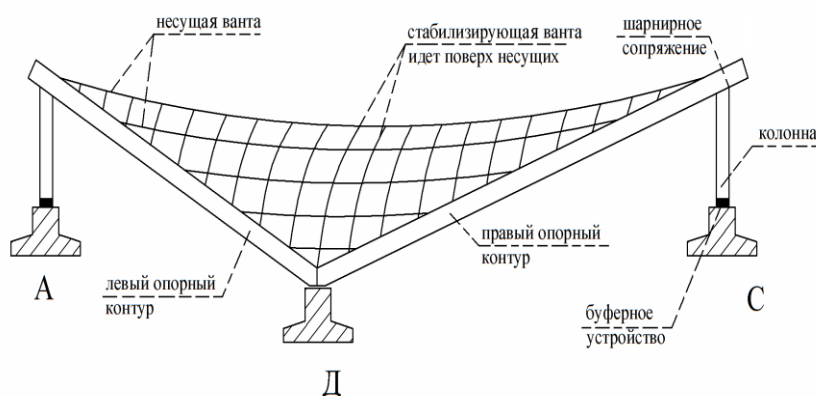


Рис. 8. Аксонометрия седловидной сетчатой поверхности
Fig. 8. Axonometry of a saddle mesh surface

Правый и левый опорные контуры на опорах «Д» и «Б» имеют возможность получать повороты относительно друг друга. Под колонны А и С (на фундаментах) устанавливают регулируемые буферные устройства. После натяжения как несущих, так и стабилизирующих вант, и придания сетчатой седловидной поверхности требуемой «геометрии» с помощью буферных устройств опускают по вертикали колонны «А» и «С». Это приводит к преднапряжению несущих и стабилизирующих вант – к стабилизации деформаций сетчатой поверхности.

После стабилизации деформаций сетчатую поверхность наполняют асбестоцементными или железобетонными плитами. При этом стабилизирующие ванты теряют преднапряжение. До замоноличивания швов (между плитами) следует с помощью буферных устройств дополнительно опустить по вертикали колонны «А» и «С» (см. аксонометрию). Таким образом, можно восстановить потерю преднапряжения в стабилизирующих вантах, после чего необходимо замонолитить швы между плитами покрытия. Этот способ стабилизации покрытия высокотехнологичен и эффективен.

Вывод. В настоящей работе проведены исследования особенностей работы большепролетных покрытий. Сформулированы конструктивные приёмы, которые позволяют стабилизировать перемещения. Дан сравнительный анализ работы, выпуклых и вогнутых большепролетных конструкций. Изложены способы стабилизации больших перемещений висячих покрытий.

Предложенные рациональные конструктивные решения позволяют уменьшить собственный вес пространственных выпуклых и вогнутых покрытий, обладающих необходимой жёсткостью, прочностью и устойчивостью.

Библиографический список:

1. «Металлические конструкции» – под редакцией Ю.И. Кудишина, Москва, Академия, 2008 г.
2. «Металлические конструкции» – под редакцией Е.И. Беленя, Москва, Стройиздат, 1986 г.
3. Беленя Е.Н. Предварительно напряженные несущие металлические конструкции. – 2-е изд. – Москва, Стройиздат, 1975. – 415 с.
4. Металлические конструкции (специальный курс) – 2-е изд. под редакцией Беленя Е.Н., – Москва, Стройиздат, 1976. – 600 с.
5. Брудка Ян, Лубински Мечислав. Легкие стальные конструкции (перевод с польского). – Москва, Стройиздат, 1974.
6. Металлические конструкции: Справочник проектировщика. 2-е изд. Под редакцией Мельникова М.П. – Москва, строй.издат. 1980. – 776с.
7. Справочник конструктора «Стальные конструкции» – под редакцией Шумакова 2004 г.
8. «Основы металлических конструкций» – В.В. Маслов, Волгоград
9. СП 20.13330.2016 Свод правил. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85.
10. СП 16.13330.2017 «Стальные конструкции». М.: Стандартинформ, 2017. АО "НИЦ "Строительство" – ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, 92 с.
11. Трофимов В.И., Еремеев П.Г. «Мембранные конструкции зданий и сооружений» – Москва, Стройиздат, 1990.
12. Юсупов А.К. «Металлические конструкции в вопросах, в ответах и в проектировании» – Махачкала, Дагестанский государственный технический университет, 2010 г.

References:

1. Metal structures – edited by Yu.I. Kudishina, Moscow, Academy, 2008 (In Russ)
2. Metal structures - edited by E.I. Belenya, Moscow, Stroyizdat, 1986(In Russ)
3. Belenya E.N. Prestressed load-bearing metal structures. – 2nd ed. - Moscow, *Stroyizdat*, 1975; 415 p. (In Russ)
4. Metal structures (special course) - 2nd ed. under the editorship of Belenya E.N., Moscow, *Stroyizdat*, 1976; 600. (In Russ)
5. Brudka Jan, Lubinski Mechislav. Light steel structures (translated from Polish). Moscow, *Stroyizdat*, 1974. (In Russ)
6. Metal structures: A designer's guide. 2nd ed. Under the editorship of Melnikov M.P. - Moscow, stroy.izdat. 1980; 776. (In Russ)
7. Handbook of the designer "Steel structures" - edited by Shumakov 2004 (In Russ)
8. "Fundamentals of metal structures" V.V. Maslov, Volgograd (In Russ)
9. SP 20.13330.2016 Code of Practice. Loads and impacts. Updated edition of SNiP 2.01.07-85. (In Russ)
10. SP 16.13330.2017 "Steel structures". M.: Standartinform, JSC "Research Center "Construction" - TsNIISK named after V.A. Kucherenko, 2017; 92. (In Russ)
11. Trofimov V.I., Eremeev P.G. "Membrane structures of buildings and structures" - Moscow, Stroyizdat, 1990. (In Russ)
12. Yusupov A.K. "Metal structures in questions, in answers and in design" - Makhachkala, Dagestan State Technical University, 2010(In Russ)

Сведения об авторах:

Юсупов Абусупян Курашевич, доктор технических наук, профессор, кафедры «Строительные конструкции и гидротехнические сооружения»; hairulla213@mail.ru

Муселемов Хайрулла Магомедмуратович, кандидат технических наук, доцент, кафедры «Строительные конструкции и гидротехнические сооружения»; hairulla213@mail.ru

Вишталов Раджаб Исабекович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительные конструкции и гидротехнические сооружения»

Information about the authors:

Abusupyan K.Yusupov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Department of Building Structures and Hydraulic Structures; hairulla213@mail.ru

Hairulla M.Muselemov, Cand.Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Department of Building Structures and Hydraulic Structures; hairulla213@mail.ru

Rajab I. Vishtalov, Cand.Sci. (Eng.), Assoc. Prof. Department of Building Structures and Hydrotechnical Structures; hairulla213@mail.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/ Received 12.01.2023.

Одобрена после рецензирования/ Revised 31.01.2023.

Принята в печать /Accepted for publication 31.01.2023.

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 20 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 Microsoft Word, CorelDraw, Microsoft Visio и т. п.). Использование точечных форматов (.bmp, .jpeg, .tif, .html) допустимо только для рисунков, представление которых в векторных форматах невозможно (фотографии, копии экрана монитора и т. п.). Название рисунка указывается на русском и английском языках.

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 (остальных граф таблицы). 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 редколлгией 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: vestnik.dgtu@mail.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 Shamilya Ave., Makhachkala 367026, Daghestan, Russia. Daghestan State Technical University, Tutorial-Lecture Building 2, Editorial Board «Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences». Technical questions can be clarified by e-mail: vestnik.dgtu@mail.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– №1 – 2023.

HERALD

OF DAGHESTAN STATE TECHNICAL UNIVERSITY. TECHNICAL SCIENCES
Makhachkala, Volume 50, No.1. 2023.

Верстка: Красикова А.В.
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.
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»

Подписано в печать 31.03.2023г. Сдано в печать 08.05.2023г.
Формат 60x84 ¹/₈. Гарнитура «Times». Бумага офсетная
Тираж 500. Усл. п.л. 31,25. Уч. изд.л. 33,8.
Заказ № 367.

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