

ISSN (Print) 2073-6185
ISSN (On-line) 2542-095X

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



Том 52, № 1, 2025.

ВЕСТНИК

ДАГЕСТАНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА.
ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ
Volume 52, No.1, 2025.

HERALD

OF DAGESTAN STATE TECHNICAL UNIVERSITY.
TECHNICAL SCIENCES

Журнал основан в 1997 году.

Выходит 4 раза в год

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

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

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

© Учредитель и издатель ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет», 2025.

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

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

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

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

© Founder and Publisher Daghestan State Technical University, 2025



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

ВЕСТНИК ДАГЕСТАНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА. ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ. ТОМ 52, № 1, 2025

Главный редактор: Алиев Р.М., д.т.н., профессор Дагестанского государственного технического университета, Махачкала, РФ.

<https://orcid.org/0000-0002-3061-4121>

Заместитель главного редактора: Эсетова А.М., д.э.н., профессор Дагестанского государственного технического университета, г. Махачкала, РФ.

<https://orcid.org/0000-0003-1093-5507>

Редакционная коллегия:

Научная рубрика «Энергетика и электротехника»

Ответственный редактор: Евдулов О.В., д.т.н., доцент, ДГТУ, Махачкала, РФ.

Ахмедов Г.Я., д.т.н., профессор, зав. кафедрой ДГТУ, Махачкала, РФ.

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

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

Кобзаренко Д.Н., д.т.н., профессор Института проблем геотермии Дагестанского научного центра РАН, г. Махачкала, РФ.

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

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

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

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

Сулин А.Б., д.т.н., профессор, член-корр. MAX, 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.

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

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

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

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

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

Редакционный совет:

Председатель редакционного совета:

Якимович Б.А., д.т.н., профессор, Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашникова, г. Ижевск, РФ. <https://orcid.org/0000-0001-7363-1071>

Сопредседатели:

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

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

Члены редакционного совета:

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

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

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

Группы научных специальностей

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

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

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

2.3.4. Управление в организационных системах (технические науки)

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

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

2.3.7. Компьютерное моделирование и автоматизация проектирования (технические науки)

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

2.1.5. Строительные материалы и изделия (технические науки),

2.1.9. Строительная механика (технические науки)

Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. Том 52, № 1, 2025. 252с.

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

Адрес учредителя и издателя 367015, РД, г. Махачкала, пр. И.Шамиля, 70, ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет». Тел./факс (8722)623715; (8722)623964 e-mail:vestnik.dgtu@mail.ru Website: <http://vestnik.dgtu.ru/>

СОДЕРЖАНИЕ

Энергетика и электротехника.....	6
И.Е. Лобанов. Моделирование интенсифицированного теплообмена в каналах с диафрагмами в ламинарной, переходной и турбулентной областях для перспективных теплообменников ракетно-космической техники.....	6
Р.С. Рудник, А.Ф. Матвеев, В.Н. Ковальнов. Газодинамическая температурная стратификация в трубе Леонтьева: аналитическое исследование и численное моделирование.....	13
В.В.Чернявская, В.Б.Сапожников, И.Ю.Голованов, М.А. Угольникова. Оценка влияния интенсификаторов теплообмена на энергомассовую эффективность кристаллизаторов	22
М.В. Шамаров, В.И. Алёшин, И.А. Калмыков, А.М. Шамаров. Повышение эффективности работы силовых трансформаторов за счет интенсификации их охлаждения во время работы.....	31
 Информационные технологии и телекоммуникации.....	39
А.Р. Айдинян, Д.Г. Кирсанов. Обеспечение информационной безопасности в производственной сети промышленного предприятия.....	39
В.В. Афонин. Моделирование движения линейных объектов управления к внешней функциональной траектории.....	49
А.А. Гавришев. К вопросу об усовершенствовании систем безопасности критически важных объектов, как объектов критической информационной инфраструктуры	57
В.В. Гарбузов, А.П. Преображенский. Моделирование рассеивания электромагнитных волн на полых структурах с эллиптическим поперечным сечением	67
Малавараге Н.С. Девараже, А.А. Семенов. Перспективы применения BIM для создания устойчивых и энергоэффективных зданий в различных климатических условиях	77
И.В. Карпасюк, А.И. Карпасюк. Математическая модель определения степени склонности к подверженности киберпреступлению.....	87
И.И. Лившиц. Оценка рисков утечки персональных данных от атак по каналам поставщиков.....	97
С.И. Носков, С.В. Беляев. Оценивание параметров линейной регрессии путем минимизации суммы превышений модулей ошибок аппроксимации относительно заданного уровня	105
К.А. Польщиков, Т.Н. Махди. Оценивание вероятности доставки сообщений в IoT-системе	113
А.Б. Темирова. Сравнительный анализ фреймворков для разработки мобильных приложений: нативные, гибридные или кроссплатформенные решения	122
Л.В. Черкесова, В.А. Савельев, Е.А. Ревякина, А.Р. Полулях, М.А. Семенцов. Механизм восстановления данных в результате их повреждения, заражения и/или несанкционированного изменения	134
П.И. Шариков, А.В. Красов, А.В. Майоров. Архитектура интегрированного java-приложения для анализа журналов с целью обнаружения компьютерных атак в информационных системах посредством реагирования на различные аномалии безопасности	147
Х.Б. Штанчайев, З.Т. Мугутдинов. Модификация автоматического метода извлечения причинно-следственных связей, основанного на шаблонах и Байесовском классификаторе	162
Т.А. Юрошева, А.В. Калиниченко. Разработка программного модуля для автоматизации процесса расчёта водопотребления и водоотведения с использованием среды разработки DYNAMO STUDIO	173
А.И. Янгиров, И.М. Янгиров, И.Г. Дровникова, В.Р. Романова, П.М. Дуплякин. Влияние системы «человек-машина-среда» на надежность автоматизированных систем ОВД Российской Федерации	183
 Строительство и архитектура.....	193
Э.К. Агаханов, М.К. Агаханов, Е.В. Труфанова, А.З. Джабраилов. Моделирование каркаса уникального здания параметрической архитектуры на основе применения поверхности «цилиндр-цилиндр»	193
М.Р. Гусейнов, Д.Н. Селимханов. Современные возможности применения цементобетона при строительстве дорожных одежд	202
Г.В. Несветаев, Г.Н. Хаджишалапов, И.А. Животкова. Анализ критериев стойкости модифицированных строительных растворов при различных воздействиях	210
А.А. Фролова, Д.Ф. Карпов, Х.М. Вафаева, З.А. Гаевская. Тепловизионное обследование общеобразовательных учреждений в г. Москве	219
А.К. Юсупов, Х.М. Муселемов, Р.И. Вишталов. Расчетные модели плит с односторонними связями	227
Б.М. Языев, С.В. Литвинов, Е.В. Виноградова, М.А. Магомедов. Вариационно-разностный подход в расчете трехслойной балки с учетом ползучести среднего слоя	242
 Требования к оформлению статей	251

Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation

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

HERALD OF DAGESTAN STATE TECHNICAL UNIVERSITY. TECHNICAL SCIENCES. V o l u m e 5 2 , N o . 1 , 2 0 2 5 .

Editor-in-Chief: Rasul M. Aliev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia;
<https://orcid.org/0000-0002-3061-4121>

Deputy Editor: Aida M. Esetova, Dr. Sci. (Econom.), Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia;
<https://orcid.org/0000-0003-1093-5507>

Editorial Board: Scientific rubric «Energy and Electrical Engineering»

Executive editor: Oleg V. Evdulov, Dr. Sci. (Eng.), Assoc. Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia;

Ganapi J. Akhmedov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia;

Alexander P. Ivanov, Dr. Sci. (Mathematics and Physics), Moscow Institute of Physics and Technology (State University), Dolgoprudny, Russia;

Nicholay I. Kargin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Vice Rector, Deputy Director of the Institute for Functional Nuclear Electronics, National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia;

Dmitry N. Kobzarenko, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences Institute of Geothermal Problems, Daghestan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Makhachkala, Russia;

Alexander A. Krugljakov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, General Director Wissenschaftliche Beratung und Handelsvertretung, Vladimir M. Kutuzov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, President St. Petersburg Electrotechnical University «LETI», Saint-Petersburg, Russia;

Makomed 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. Shakhtar, 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;

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;

Batyr M. Yazyev, Dr. Sci. (Eng.), Advisor to RAASN, Professor of Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia.

Editorial council

Chairman of the editorial council:

Boris A. Yakimovich, Dr. Sci. (Eng.), Professor, 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),

Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. Vol. 52, No.1

Makhachkala, 2025-252p.

Published by Decision of the Academic Council

Daghestan State

Technical University

Edition and Publisher

Address: 70 I. Shamil Ave., Makhachkala, the Republic of Daghestan

367015, Russia.

Daghestan State

Technical University

Tel./fax (8722)623715

(8722)623964

CONTENTS

Energy and Electrical Engineering	6
I.E. Lobanov. Modeling of intensified heat exchange in channels with diaphragms in laminar, transitional and turbulent regions for promising heat exchangers of rocket and space technology.....	6
R.S. Rudnik, A.F. Matveev, V.N. Kovalnogov. Gas-Dynamic Temperature Stratification in the Leontiev Tube: Analytical Study and Numerical Modeling	13
V.V. Chernyavskaya, V.B. Sapozhnikov, I.Yu. Golovanov, M.A. Ugolnikova. Assessment of the effect of heat transfer intensifiers on the energy and mass efficiency of crystallizers	22
M.V. Shamarov, V.I. Aleshin, I.A. Kalmykov, A.M. Shamarov. Improving the efficiency of power transformers by intensifying their cooling during operation	31
Information Technology and Telecommunications	39
A.R. Aydynan, D.G. Kirsanov. Ensuring information security in the production network of an industrial enterprise	39
V.V. Afonin. Modeling the motion of linear control objects to an external functional trajectory.....	49
A.A. Gavrishev. On the issue of improving the security systems of critical facilities as objects of critical information infrastructure	57
V.V. Garbuzov, A.P. Preobrazhensky. Simulation of electromagnetic wave scattering on hollow structures with elliptical cross section	67
Malavarage N.S. Dewaraja, A.A. Semenov. Prospects for applying bim to create sustainable and energy-efficient buildings in different climatic conditions.....	77
I.V. Karpasyuk, A.I. Karpasyuk. Mathematical Model for Determining the Degree of Propensity to be Exposed to Cybercrime	87
I.I. Livshits. Assessment of the risks of personal data leakage from through supplier channel attacks	97
S.I. Noskov, S.V. Belyaev. Estimation of linear regression parameters by minimizing the sum of the excesses of the approximation error modules relative to a given level	105
K.A. Polshchikov, T.N. Mahdi. Estimating the probability of messages delivery in an IoT system.....	113
A.B. Temirova. Comparative analysis of frameworks for mobile application development: native, hybrid or cross-platform solutions	122
L.V. Cherkesova, V.A. Savylev, E.A. Revyakina, A.R. Polulyakh, M.A. Sementsov. Mechanism for data recovery as a result of data corruption, infection and/or unauthorized modification	134
P.I. Sharikov, A.V. Krasov, A.V. Mayorov. Architecture of an integrated java application for log analysis to detect computer attacks in information systems by responding to various security anomalies	147
H.B. Shtanchaev, Z.T. Mugutdinov. Modification of an automatic method for extracting causal relationships based on templates and a Bayesian classifier	162
T.A. Yurosheva, A.V. Kalinichenko. Development of a software module for automating the process of calculating water consumption and water disposal using the DYNAMO STUDIO development environment.....	173
A.I. Yangirov, I.M. Yangirov, I.G. Drovnikova, V.R. Romanova, P.M. Duplyakin. Influence of the human-machine-environment system on reliability automated systems IAB of the Russian Federation	183
Building and Architecture	193
E.K. Agakhanov, M.K. Agakhanov, E.V. Trufanova, A.Z. Dzhabrailov. Modeling the frame of a unique building of parametric architecture based on the application of the "cylinder-cylinder" surface	193
M.R. Guseinov, D.N. Selimkhanov. Modern possibilities of using cement concrete in road construction.....	202
G.V. Nesvetaev, G.N. Hadzhishalapov, I.A. Zhivotkova. Effect of redispersible polymer powders on some properties of mortars with complex mineral additives.....	210
A.A. Frolova, D.F. Karpov, Kh.M. Vafaeva, Z.A. Gaevskaya. Thermal imaging survey of general education institutions in Moscow	219
A.K. Yusupov, Kh.M. Muselemov, R.I. Vishtalov. Calculation models of slabs with one-way connections.....	227
B.M. Yazyev, S.V. Litvinov, E.V. Vinogradova, M.A. Magomedov. Variational-difference Approach to calculation of a Three-layer beam taking into account the creep of the middle layer.....	242
Formatting requirements for papers	251

ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА
ENERGY AND ELECTRICAL ENGINEERING

УДК 532.517.4: 536.24

DOI: 10.21822/2073-6185-2025-52-1-6-12



Оригинальная статья /Original article

**Моделирование интенсифицированного теплообмена в каналах
с диафрагмами в ламинарной, переходной и турбулентной областях
для перспективных теплообменников ракетно-космической техники**

И.Е. Лобанов

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

Резюме. Цель. Целью исследования является численное низкорейнольдсовое моделирование теплоотдачи в трубе с выступами полукруглых поперечных профилей с критериями Рейнольдса, характерными для ламинарных, переходных и турбулентных течений теплоносителей. **Метод.** Реализованные методом (ФКОМ-ом) в статье были сгенерированы как местные, так и интегральные, как стационарные, так и нестационарные характеристики потока и теплоотдачи в трубе с внутренними рёбрами при переходных и ламинарных поточных режимов теплоносителя, что позволило детерминировать для этих режимов уровни интенсификации теплообмена, которые удовлетворительно коррелируют с имеющимися опытными данными. **Результат.** Моделирование теплообмена на воздухе в трубах с турбулизаторами на базе низкорейнольдсовой модели Ментера при высоких числах Рейнольдса вплоть до миллиона обуславливает перспективное моделирование теплообмена в трубах с турбулизаторами данным методом и при более высоких числах Рейнольдса. **Вывод.** Модель адекватно описывает реализуемые явления интенсифицированной теплоотдачи для ламинарного, переходного и турбулентного режимов течений теплоносителя с широким диапазоном чисел Прандтля. Полученные закономерности могут использоваться при инженерном и научном расчете интенсифицированного ламинарного, переходного и турбулентного теплообмена при течении в каналах с выступами, используемых в перспективных теплообменниках, применяемых, в том числе, в авиационной и ракетно-космической технике.

Ключевые слова: моделирование, теплоотдача, интенсификация, турбулизатор, теплообменный аппарат, режим течения, авиационный, ракетный, космический, диафрагма

Для цитирования: И.Е. Лобанов. Моделирование интенсифицированного теплообмена в каналах с диафрагмами в ламинарной, переходной и турбулентной областях для перспективных теплообменников ракетно-космической техники. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025;52(1):6-12. DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-1-6-12

Modeling of intensified heat exchange in channels with diaphragms in laminar, transitional and turbulent regions for promising heat exchangers of rocket and space technology

I.E.Lobanov

Moscow Aviation Institute (National Research University),
4 Volokolamskoe highway, A-80, GSP-3, Moscow 125993, Russia

Abstract. Objective. The aim of the study is numerical low-Reynolds modeling of heat transfer in a pipe with protrusions of semicircular transverse profiles with Reynolds criteria characteristic of laminar, transitional and turbulent flows of coolants. **Method.** Implemented by the method (FCOM-om) in the article, both local and integral, both stationary and non-stationary characteristics of flow and heat transfer in a pipe with internal ribs were generated in transient and laminar flow modes of the coolant, which made it possible to determine for these modes the levels of heat transfer intensification, which satisfactorily correlate with the available experi-

mental data. **Result.** The successful modeling of air heat transfer in pipes with turbulators based on the low-Reynolds Mentor model at high Reynolds numbers up to one million determines the promising modeling of heat transfer in pipes with turbulators by this method and at higher Reynolds numbers. **Conclusion.** Therefore, the applied model adequately describes the realized phenomena of intensified heat transfer for laminar, transient and turbulent modes of coolant flows with a wide range of Prandtl numbers. The obtained patterns can be used in the engineering and scientific calculation of intensified laminar, transient and turbulent heat transfer during flow in channels with protrusions used in promising heat exchangers used, among other things, in aviation and rocket and space technology.

Keywords: modeling, heat transfer, intensification, turbulator, heat exchanger, flow mode, aviation, rocket, space, diaphragm

For citation: I.E. Lobanov. Modeling of intensified heat exchange in channels with diaphragms in laminar, transitional and turbulent regions for promising heat exchangers of rocket and space technology. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2025;52 (1): 6-12. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-1-6-12

Введение. В разнообразных областях техники распространены различные типы трубчатых теплообменных аппаратов и теплообменных устройств, где, в результате интенсификации теплоотдачи может быть достигнуто снижение их массо- и габаритных показателей для заданного значения тепловых потоков, гидропотерь, расхода и температурного уровня теплоносителя. Нередко задача заключается в снижении температурных уровней поверхностей теплоносёма при фиксированном режимном и конструктивном наборе характеристик.

Расчётные способы исследований интенсификаций теплообмена при турбулентных потоках в трубах разработаны ещё недостаточно [1, 2]. Чаще всего эти методы базируются на упрощённых моделях сложного физического явления, а сумма допущений приводит к заметному различию между расчёты и экспериментальным материалом [3, 4]. Кроме того, теоретические исследования в данном направлении довольно разрознены и узкоограничены [5-9].

Постановка задачи. В связи с этим, возникает необходимость разработки современных, уточнённых по сравнению с существующими, теоретических методов исследований интенсифицированного теплообмена при ламинарном, переходном, турбулентном течениях в трубах.

В рамках данной статьи под интенсификацией понимается использование искусственных турбулизаторов потока на поверхности [10-12].

Моделирование рассматривает 2-мерные поверхности с выступами, что применимо и для трубы с периодической диафрагмой. Течения в каналах могут быть ламинарных и переходных режимов для вязких теплоносителей (напр., масла) и турбулентных режимов для газовых теплоносителей (например, воздух).

Методы исследования. Рассмотрим методы моделирования течения и теплообмена для этих условий. Для ламинарных и переходных течений ($Re=10^2 \div 10^4$) результаты моделирования будут нижеследующими. В переходных режимах у потоков перемежаемости потоков в переходных режимах обусловливают колеблющийся характер коэффициента теплоотдачи [10-12].

Теоретические исследования теплоотдачи при её интенсификации для потоков со слабой турбулентностью и в переходных областях производилось в ощутимо меньших объёмах, нежели для областей с развитой турбулентностью. Интенсификация теплоотдачи в переходных диапазонах потоков изучалось теоретическим способом для выступов с трансверсальными профилями в форме полукругов на многоблоковых численных технологиях, на расчётах факторизованными конечно-объёмными технологиями (ФКОМ-ами) рейнольдсового уравнения и энергетического уравнения [13, 14]. Численные

расчёты показали, что интенсифицирование теплообмена будет происходить с некоторых критериев Рейнольдса, а для низких критериев Рейнольдса оно незначительно. Также были рассчитаны линии токов для переходных условий течения, которые значительно различаются при увеличении критерия Рейнольдса $Re=2\cdot10^3\div10^4$, что обосновывает качественное увеличение интенсификации теплообмена [15, 16].

Низкорейнольдсовая ламинарная область изучена опытным образом и было установлено, что при $Re\approx1600$ режим течения становится переходным, поскольку качественно меняется характер изменения гидравлического сопротивления [17–19, 3, 20].

Моделирования режимов выше $Re>1600$ ($Re=1,6\cdot10^3\div2\cdot10^3$) и далее вплоть до $Re=2,4\cdot10^3$ производилось так же, как и для турбулентного потока апробированным способом [15, 16].

Обсуждение результатов. В работе получена расчётная информация по интенсифицированной теплоотдаче и гидросопротивлению для рассматриваемых условий ($Re=10^2\div2,4\cdot10^3$; $d/D=0,80\div0,92$; $t/D=0,33\div1,22$; $Pr=170\div320$).

Максимальные значения относительного теплообмена составили $Nu/Nu_{\text{гл}}\approx2,5$ при $Re=2,4\cdot10^3$; $d/D=0,80$; $t/D=0,66$; $Pr=250$, а относительное гидросопротивление были наибольшими при $\xi/\xi_{\text{гл}}\approx2,5$ при $Re=2,4\cdot10^3$; $d/D=0,80$; $t/D=0,33$; $Pr=250$.

Для более низких турбулизаторов $d/D=0,86$ вышеуказанные значения ниже: $Nu/Nu_{\text{гл}}\approx2,3$ при $\xi/\xi_{\text{гл}}\approx2,3$ при тех же условиях идентичности.

При уменьшении высоты турбулизатора до параметра $d/D=0,92$ вышеуказанные относительные параметры будут ещё меньшими. Минимальные значения относительного теплообмена имели место в ламинарной области течения при $Re=10^2$: $Nu/Nu_{\text{гл}}\approx0,90\div0,95$ при относительных гидросопротивлениях $\xi/\xi_{\text{гл}}\approx1,15\div1,75$.

Интенсифицирование теплоотдачи проявляется в ламинарной области при $Re=10^3$, когда значения относительного интенсифицированного гидросопротивления $\xi/\xi_{\text{гл}}\approx1,35\div2,25$. Полученные в исследовании расчётные данные хорошо согласуются с аналогичными данными, ранее полученными автором [13, 15, 16].

В качестве иллюстрации на рис. 1 для определённых течений приведены вычисленные линии тока между рёбрами с полукруглым трансверсальным профилем, вычисленным на основах реализованной в статье ментеровской модели (для транзитивного диапазона), что характерно для переходных и ($Re=2\cdot10^3\div10^4$; $d/D=0,875\div0,983$; $t/D=0,486\div1,987$; $Pr=0,72\div50$) (рис. 2) и ламинарных (рис. 1) режимов течений ($Re=10^2\div1,5\cdot10^3$; $d/D=0,80\div0,92$; $t/D=0,33\div1,94$; $Pr=170\div320$).

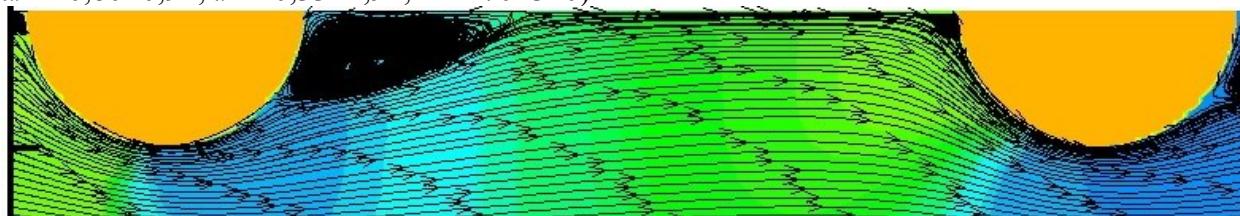


Рис. 1 - Линии тока для трубы с выступами полукруглого трансверсального профиля при $t/D=0,66$, $d/D=0,80$, $Pr=170$, $Re=10^2$ (ламинарное течение)

Fig. 1 - Streamlines for a pipe with protrusions of a semicircular transverse profile at $t/D=0.66$, $d/D=0.80$, $Pr=170$, $Re=10^2$ (laminar flow)

Течения в каналах теплообменных аппаратов, используемых в авиационной и ракетно-космической технике, для газовых теплоносителей могут быть и турбулентных режимов, поскольку для этих режимов имеет место большая теплоотдача, чем при невысоких числах Рейнольдса. Были проведены также численные исследования для более высоких критериев Рейнольдса для труб с турбулизаторами: $Re=10^4\div10^6$.

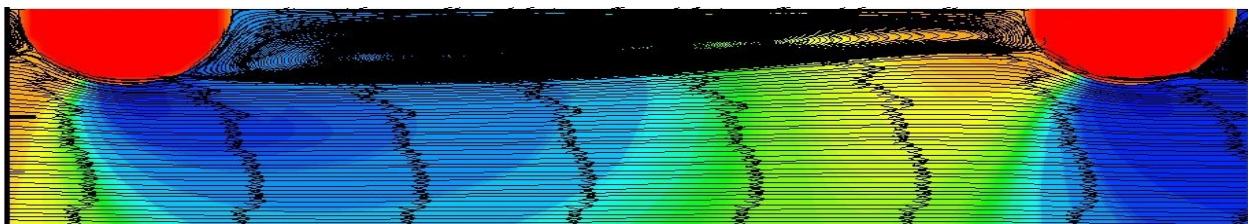


Рис. 2 - Линии тока для трубы с выступами полукруглого трансверсального профиля при $t/D=0,66$, $d/D=0,86$, $Pr=250$, $Re=2,4 \cdot 10^3$ (переходное течение)

Fig. 2 - Streamlines for a pipe with protrusions of a semicircular transverse profile at $t/D=0.66$, $d/D=0.86$, $Pr=250$, $Re=2.4 \cdot 10^3$ (transitional flow)

Влияние на интегральные характеристики течения и теплообмена в трубах с турбулизаторами ($d/D=0,95 \div 0,90$ и $t/D=0,25 \div 1,00$) структуры интенсифицированного потока при больших числах Рейнольдса $Re=10^6$ выглядит нижеследующим образом.

Расчётные данные по теплообмену на воздухе в трубах с турбулизаторами полукруглого поперечного сечения, полученные по сгенерированной в данной работе теории, очень хорошо согласуются с существующим экспериментом для больших чисел Рейнольдса ($Re=4 \cdot 10^5$), а также для несколько меньших чисел Рейнольдса ($Re=2 \cdot 10^5$). Кроме того, эти данные хорошо согласуются и с теоретическими данными, полученными по независимой четырёхслойной модели турбулентного пограничного слоя [16] по осреднённому теплообмену, в то время как данные по низкорейнольдсовой модели позволяют рассчитать и локальный теплообмен. Последнее обосновывает, что этот метод обоснованно применять и для более высоких чисел Рейнольдса для вышеуказанных геометрических параметров труб.

Полученные расчётные данные по интенсифицированному теплообмену в трубах с полукруглыми турбулизаторами на воздухе для $d/D=0,90$, $t/D=0,25 \div 1,00$, $Re=10^6$, относительный теплообмен $Nu/Nu_{\text{гл}}$ ещё более увеличивается по сравнению с меньшими значениями числа Рейнольдса, что, естественно, сопровождается ещё большим увеличением гидравлического сопротивления.

Как показывают полученные расчётные данные по интенсифицированному теплообмену в трубах с полукруглыми турбулизаторами на воздухе для $d/D=0,95$, $t/D=0,25 \div 1,00$, $Re=10^6$, относительный теплообмен $Nu/Nu_{\text{гл}}$ увеличивается с ростом числа Рейнольдса по сравнению с меньшими значениями числа Рейнольдса гораздо меньше, чем при более высоких турбулизаторах с $d/D=0,95$ и $t/D=0,25$ и $t/D=0,50$, а при $d/D=0,95$ и $t/D=1,00$ роста относительного теплообмена не происходит (рис. 3).

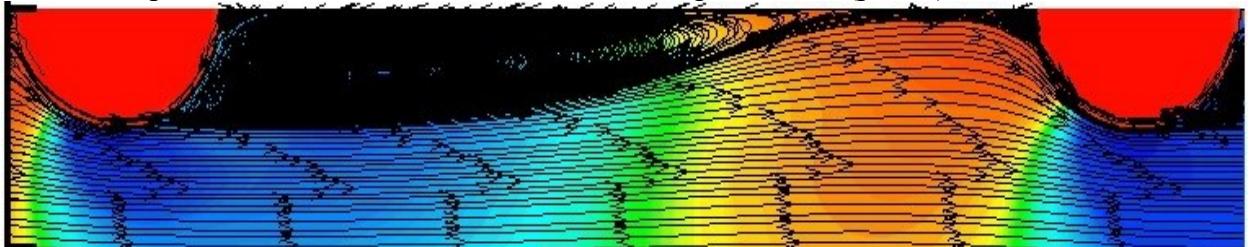


Рис. 3 - Линии тока для трубы с выступами полукруглого трансверсального профиля при $t/D=0,50$, $d/D=0,90$, $Pr=0,72$, $Re=10^6$ (турбулентное течение)

Fig. 3 - Streamlines for a pipe with protrusions of a semicircular transverse profile at $t/D=0.50$, $d/D=0.90$, $Pr=0.72$, $Re=10^6$ (turbulent flow)

В отличие от аналогичных случаев с $d/D=0,90$ рост теплоотдачи при $d/D=0,95$ сопровождается гораздо меньшим увеличением гидравлического сопротивления, что обусловлено уменьшением генерации дополнительных вихреобразований в последнем случае.

Следовательно, интенсификация теплообмена при больших числах Рейнольдса (порядка $Re=10^6$) может быть даже несколько сильнее, чем для меньших критериев Рейнольдса (порядка $Re=4 \cdot 10^5$) для относительно высоких турбулизаторов потока (порядка $d/D=0,90$), однако здесь придётся ощутимым образом повысить уровень гидро-

потерь. Для более низких турбулизаторов (порядка $d/D=0,95$) интенсификация теплообмена при больших числах Рейнольдса (порядка $Re=10^6$) не всегда выше [16], чем для меньших чисел Рейнольдса (порядка $Re=4\cdot10^5$), но и достигается это для малых и средних шагов между турбулизаторами (порядка $t/D=0,25$ и $t/D=0,50$) при менее ощутимых гидропотерях.

Полученные по низкорейнольдсовой модели данные по интенсифицированному теплообмену в трубах с турбулизаторами соответствуют физическим представлениям реализуемых процессов. Как показывает анализ полученных для сравнений данных по теплосъёму для шероховатых каналов для больших чисел Рейнольдса $Re=10^6$, относительный теплообмен в шероховатых трубах приближается к относительному теплообмену в трубах с турбулизаторами с $t/D=0,50$ при $d/D=0,90$ и с $t/D=0,25$ при $d/D=0,95$.

В более ранних работах [10] был установлен вывод, что по мере повышения критерия Рейнольдса относительный теплообмен в шероховатых трубах приближается к относительному теплообмену в трубах с турбулизаторами с малыми относительными шагами промежу турбулизаторами t/D . Последнее обосновывает, что и при ещё большем увеличении числа Рейнольдса, вплоть до $Re=10^6$, данная тенденция сохраняется, что подтверждается полученным расчётными данными для условий течения воздуха в трубах с турбулизаторами с $d/D=0,95\div0,90$, $t/D=0,25\div1,00$.

Для верификации полученных данных по интенсифицированному теплообмену в трубах с турбулизаторами для высоких чисел Рейнольдса $Re=10^6$, полученных по сгенерированному в данной статье способу, были произведены соответствующие расчётные работы по способам, которые использовались в ранних исследованиях [13, 15, 16].

Как показали расчёты теплообмена для 12-ти секций турбулизаторов по методу [13, 15, 16], различие промежу ним и сгенерированными в настоящей статье способом составит в пределах ($3\div4\%$), но сходимость настоящего способа более быстрая, примерно на пару порядков по время с увеличением точностей базовых характеристик с 10^{-4} для метода [13, 15, 16] до 10^{-5} для настоящего способа.

Результаты исследования доказывают преимущество метода, разработанного в данной научной статье. Проведённое в данной статье успешное моделирование теплообмена на воздухе в трубах с турбулизаторами при $d/D=0,95\div0,90$, $t/D=0,25\div1,00$ на базе низкорейнольдсовой модели Ментера при высоких числах Рейнольдса вплоть до $Re=10^6$ обусловливает перспективное моделирование теплообмена в трубах с турбулизаторами данным методом и при более высоких числах Рейнольдса.

Следовательно, применённая модель адекватно описывает реализуемые явления интенсифицированной теплоотдачи для ламинарного, переходного и турбулентного режимов течений теплоносителя с широким диапазоном чисел Прандтля.

Вывод. В данном научном исследовании были произведены математические моделирования теплосъёмов в каналах с внутренним оребрением полукруглого поперечного профилирования с числами О.Рейнольдса, которые были характерны для переходного ($Re=2\cdot10^3\div10^4$) и ламинарного ($Re=10^2\div2\cdot10^3$) и гидрорежима, на основаниях разноблочных численных технологий, сформированных на расчетах конечно-объемным факторизованным способом рейнольдсовых уравнений и энергетических уравнений, и выявлены уровни интенсификации теплосъёмов для этих условий в широком диапазоне критерия Прандтля.

Получены результаты по интенсификации теплоотдачи для более высоких чисел Рейнольдса ($Re\leq10^6$) для воздуха, которая может быть выше при ощутимом увеличении гидросопротивления, чем для меньших чисел ($Re=4,0\cdot10^5$), для относительно высоких турбулизаторов потока $d/D=0,90$ для всего рассматриваемого диапазона относительных шагов между ними $t/D=0,25\div1,00$, превышая значения для шероховатых труб; а при более низких турбулизаторах с $d/D=0,95$ происходит определённое увеличение относительного (безразмерного) теплообмена для больших чисел Рейнольдса ($Re=10^6$) сравнительно с меньшими числами ($Re=4,0\cdot10^5$) только при малых шагах между турбулизаторами

с $t/D=0,25$, приближаясь к значениям для шероховатых труб, а при увеличении относительного шага между турбулизаторами ($t/D=0,50 \div 1,00$) этого увеличения почти не происходит.

Реализованные методом (ФКОМ-ом) в статье были сгенерированы как местные, так и интегральные, как стационарные, так и нестационарные характеристики потока и теплоотдачи в трубе с внутренними рёбрами при переходных и ламинарных поточных режимов теплоносителя, что позволило детерминировать для этих режимов уровни интенсификации теплообмена, которые удовлетворительно коррелируют с имеющимися опытными данными.

Полученные закономерности могут использоваться при инженерном и научном расчёте интенсифицированного ламинарного, переходного и турбулентного теплообмена при течении в каналах с выступами, используемых в перспективных теплообменниках, применяемых, в том числе, в авиационной и ракетно-космической технике.

Библиографический список:

1. Мигай В.К. Моделирование теплообменного энергетического оборудования. Л.: Энергоатомиздат. Ленинградское отделение, 1987. 263 с.
2. Мигай В.К. Повышение эффективности современных теплообменников. Л.: Энергия. Ленинградское отделение, 1980. 144 с.
3. Гортышов Ю.В., Олимпиев В.В. К вопросу об интенсификации теплообмена посредством сферических выемок // Известия вузов. Авиационная Техника. 1999. № 3. С. 54-58.
4. Гортышов Ю.В., Олимпиев В.В. Теплообменные аппараты с интенсифицированным теплообменом. Казань: КГТУ им. А.Н.Туполева, 1999. 175 с.
5. Kant K., Qayoum A. Numerical investigations of fluid flow and heat transfer in a ribbed heated duct with variable aspect ratios. *Recent Trends in Fluid Mechanics*. 2016;3(1): 23-37.
6. Saha S.K., Dayanidhi G.L. Thermo-Fluid Characteristics of Laminar Flow of Viscous Oil through a Circular Tube having Integral Helical Corrugations and Fitted with Centre-Cleared Twisted-Tape. *Heat Mass Transfer*. 2012;48:2059-2068.
7. Tanda G. Effect of Rib Spacing on Heat Transfer and Friction in a Rectangular Channel with 45-Deg Angled Rib Turbulators on One/Two Walls. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2011; February. 54 (54):1081-1090.
8. Менялкина Е.Н. Исследование влияния формы оребрения на динамику потока и сопротивление канала // Альманах современной науки и образования. 2017. № 4-5 (118). С. 65-68.
9. Park J., Park S., Ligrani P. M. Numerical predictions of detailed flow structural characteristics in a channel with angled rib turbulators. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2015;November.29 (11): 4981-4991.
10. Калинин Э.К., Дрейцер Г.А., Копп И.З. Эффективные поверхности теплообмена. Москва : Энергоатомиздат, 1998. 407 с.
11. Калинин Э.К., Дрейцер Г.А., Ярхо С.А. Интенсификация теплообмена в каналах. М.: Машиностроение, 1972. 220 с.
12. Калинин Э.К., Дрейцер Г.А., Ярхо С.А. Интенсификация теплообмена в каналах. М.: Машиностроение, 1990. 208 с.
13. Лобанов И.Е., Калинин Э.К. Теоретическое исследование, сопоставление с экспериментом линий тока и составляющих кинетической энергии турбулентных пульсаций в вихревых структурах в трубах с турбулизаторами // Отраслевые аспекты технических наук. 2011. № 12. С. 4-15.
14. Быстров Ю.А., Исаев С.А., Леонтьев А.И. Численное моделирование вихревой интенсификации теплообмена в пакетах труб. СПб: Судостроение, 2005. 398 с.
15. Лобанов И.Е. Математическое моделирование теплообмена в трубах с турбулизаторами в области перехода к турбулентному течению // Вестник Ангарского государственного технического университета. 2019. Том 1. № 13. С. 60-65.
16. Лобанов И.Е. Математическое моделирование теплообмена в трубах с турбулизаторами, а также в шероховатых трубах, на воздухе при больших числах Рейнольдса // Отраслевые аспекты технических наук. 2013. № 9. С. 8-18.
17. Назмеев Ю.Г., Олимпиев В.В., Шинкевич О.П. Теплообмен и гидравлическое сопротивление при ламинарном течении вязкой жидкости в трубах с искусственной шероховатостью // Теплоэнергетика. 1993. № 4. С. 66-69.
18. Назмеев Ю.Г. Теплообмен при ламинарном течении жидкости в дискретно-шероховатых каналах. М.: Энергоатомиздат, 1998. 372 с.
19. Назмеев Ю.Г., Лавыгин В.М. Теплообменные аппараты ТЭС. М.: Энергоатомиздат, 1998. 288 с.
20. Klaczak A. Wärmeübertragung und Druckverlust in neuartigen Turbulenzrohren // Forsch. Ing.-Wes. 1974; 40(4):117-119.

References:

1. Migai V.K. Modeling of heat exchange power equipment. L.: Energoatomizdat. Leningrad branch, 1987:263 (In Russ.)
2. Migai V.K. Improving the efficiency of modern heat exchangers. L.: Energiya. Leningrad branch, 1984:144 (In Russ.)
3. Gortyshov Yu.V., Olympiev V.V. On the issue of intensification of heat transfer by means of spherical recesses. *Izvestiya vuzov. Aviation Equipment*. 1999;3:54-58. (In Russ.)
4. Gortyshov Yu.V., Olympiev V.V. Heat exchangers with intensified heat exchange. Kazan: KSTU named after A.N.Tupolev, 1999;175. (In Russ.)
5. Kant K., Qayoum A. Numerical investigations of fluid flow and heat transfer in a ribbed heated duct with variable aspect ratios. *Recent Trends in Fluid Mechanics*. 2016;3(1): 23-37.
6. Saha S.K., Dayanidhi G.L. Thermo-Fluid Characteristics of Laminar Flow of Viscous Oil through a Circular Tube having Integral Helical Corrugations and Fitted with Centre-Cleared Twisted-Tape. *Heat Mass Transfer*. 2012;48:2059-2068.
7. Tanda G. Effect of Rib Spacing on Heat Transfer and Friction in a Rectangular Channel with 45-Deg Angled Rib Turbulators on One/Two Walls. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2011; February. 54 (54):1081-1090.
8. Menyalkina E.N. Investigation of the influence of the fin shape on the flow dynamics and channel resistance. *Almanac of modern science and education*. 2017; 4-5 (118): 65-68. (In Russ.)
9. Park J., Park S., Ligrani P. M. Numerical predictions of detailed flow structural characteristics in a channel with angled rib turbulators. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2015; November.29 (11): 4981-4991.
10. Kalinin E.K., Dreitzer G.A., Kopp I.Z. Effective heat transfer surfaces. Moscow : Energoatomizdat, 1998;. 407 (In Russ.)
11. Kalinin E.K., Dreitzer G.A., Yarkho S.A. Intensification of heat transfer in channels. M.: Mashinostroenie, 1972;220 (In Russ.)
12. Kalinin E.K., Dreitzer G.A., Yarkho S.A. Intensification of heat transfer in channels. M.: Mashinostroenie, 1990;208 (In Russ.)
13. Lobanov I.E., Kalinin E.K. Theoretical study, comparison with experiment of current lines and kinetic energy components of turbulent pulsations in vortex structures in pipes with turbulators. *Branch aspects of Technical Sciences*. 2011;12: 4-15. (In Russ.)
14. Bystrov Yu.A., Isaev S.A., Leontiev A.I. Numerical modeling of vortex intensification of heat transfer in pipe packages. St. Petersburg: Shipbuilding, 2005; 398 (In Russ.)
15. Lobanov I.E. Mathematical modeling of heat transfer in pipes with turbulators in the field of transition to turbulent flow. *Bulletin of the Angarsk State Technical University*. 2019;1(13):60-65. (In Russ.)
16. Lobanov I.E. Mathematical modeling of heat transfer in pipes with turbulators, as well as in rough pipes, in air at high Reynolds numbers. *Branch aspects of Technical Sciences*. 2013; 9:8-18. (In Russ.)
17. Nazmeev Yu.G., Olympiev V.V., Shinkevich O.P. Heat transfer and hydraulic resistance during laminar flow of viscous liquid in pipes with artificial roughness. *Thermal power engineering*. 1993;4:66-69. (In Russ.)
18. Nazmeev Yu.G. Heat transfer during laminar fluid flow in discretely rough channels. M.: Energoatomizdat, 1998;372. (In Russ.)
19. Nazmeev Yu.G., Lavygin V.M. Heat exchangers of thermal power plants. M.: Energoatomizdat, 1998;288 (In Russ.)
20. Klaczak A. Wärmeübertragung und Druckverlust in neuartigen Turbulenzröhren. *Forsch. Ing.-Wes.* 1974; 40(4):117-119.

Сведения об авторе:

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

Information about the author:

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

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 10.12.2024.

Одобрена после рецензирования/Revised 21.01.2025.

Принята в печать/Accepted for publication 22.01.2025.

ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА
ENERGY AND ELECTRICAL ENGINEERING

УДК 533.6.011.6

DOI: 10.21822/2073-6185-2025-52-1-13-21



Оригинальная статья /Original article

**Газодинамическая температурная стратификация в трубе Леонтьева:
аналитическое исследование и численное моделирование**

Р.С. Рудник, А.Ф. Матвеев, В.Н. Ковальнов

Ульяновский государственный технический университет,
432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, д. 32, Россия

Резюме. Цель. Статья посвящена исследованию процессов теплопередачи в трубе Леонтьева, основанной на принципе газодинамической температурной стратификации. Цель работы заключается в описании механизма взаимодействия дозвуковых и сверхзвуковых потоков и выявлении ключевых параметров, влияющих на эффективность стратификации. **Метод.** Исследование выполнено с использованием аналитического подхода и численного моделирования в среде ANSYS Fluent. В рамках численного анализа были визуализированы температурные и скоростные поля, а также проанализирована плотность теплового потока. Применена модель турбулентности $k-\omega$ SST, позволяющая учитывать сложные особенности течения газа в трубе. **Результат.** Получены основные закономерности теплопередачи, включая влияние разности температур и давления между дозвуковыми и сверхзвуковыми потоками, а также роль турбулентной энергии в усилении теплообмена. Установлено, что на выходе из сверхзвукового канала газ нагревается по сравнению с входными условиями, а из дозвукового канала выходит охлаждённый поток. **Вывод.** Полученные результаты могут быть использованы для повышения эффективности теплообмена в промышленных системах и проектирования устройств для рекуперации тепла.

Ключевые слова: газодинамическая температурная стратификация, охлаждение газа, труба Леонтьева, теплопередача, численное моделирование, тепловой поток

Для цитирования: Р.С. Рудник, А.Ф. Матвеев, В.Н. Ковальнов. Газодинамическая температурная стратификация в трубе Леонтьева: аналитическое исследование и численное моделирование. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025;52(1):13-21. DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-1-13-21

**Gas-Dynamic Temperature Stratification in the Leontiev Tube:
Analytical Study and Numerical Modeling**

R.S. Rudnik, A.F. Matveev, V.N. Kovalnogov

Ulyanovsk State Technical University,
32 Northern Venets St., Ulyanovsk 432027, Russia

Abstract. Objective. The article is dedicated to the study of heat transfer processes in a Leontiev tube based on the principle of gas-dynamic temperature stratification. The objective of this work is to describe the mechanism of interaction between subsonic and supersonic flows and identify key parameters influencing stratification efficiency. **Method.** The study was conducted using an analytical approach and numerical modeling in the ANSYS Fluent environment. Temperature and velocity fields were visualized, and heat flow density was analyzed. The $k-\omega$ SST turbulence model was applied, enabling the consideration of complex gas flow characteristics in the tube. **Results.** The main heat transfer patterns were identified, including the effects of temperature and pressure differences between subsonic and supersonic flows, as well as the role of turbulent energy in enhancing heat exchange. It was established that the gas exiting the supersonic channel is heated compared to the inlet conditions, while the gas exiting the subsonic channel is cooled. **Conclusion.** The results can be used to improve the efficiency of heat exchange in industrial systems and to design heat recovery devices.

Keywords: gas-dynamic temperature stratification, gas cooling, Leontiev tube, heat transfer, numerical modeling, heat flux

For citation: R.S. Rudnik, A.F. Matveev, V.N. Kovalnogov. Gas-Dynamic Temperature Stratification in the Leontiev Tube: Analytical Study and Numerical Modeling. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2025;52(1):13-21. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-1-13-21

Введение. В современных условиях энергосбережение и повышение эффективности промышленных процессов становятся важнейшими задачами для многих отраслей, в частности для энергетики и газовой промышленности. Одной из наиболее энергоемких операций является компримирование газа, которое используется в процессах транспортировки, хранения и распределения природного газа. Этот процесс требует значительных энергетических затрат, а также создает технические трудности, связанные с теплообменом.

Снижение энергопотерь и оптимизация тепловых процессов остаются ключевыми задачами для многих промышленных систем. Традиционные методы теплообмена часто оказываются недостаточно эффективными для поддержания высоких темпов теплоотвода в условиях интенсивных газодинамических потоков. Для минимизации энергопотерь требуется внедрение новых технологий, способных существенно повысить эффективность теплообмена.

Одним из перспективных методов, способных значительно улучшить процессы теплообмена, является газодинамическая температурная стратификация. Она позволяет значительно увеличить теплопередачу между газовыми потоками за счет отличия адиабатной температуры стенки в сверхзвуковом тракте потока от адиабатной температуры стенки в тракте дозвуковом. Применение этого метода способно существенно повысить общую эффективность систем компримирования и других промышленных процессов.

Постановка задачи. Целью данной работы является анализ процессов теплопередачи при газодинамической стратификации, выполненный с использованием аналитических методов и численного моделирования в ANSYS Fluent. Полученные результаты позволят выявить ключевые параметры, влияющие на эффективность стратификации, и определить их оптимальные значения для применения в промышленных условиях.

Методы исследования. Механизм газодинамической температурной стратификации. Принцип работы трубы Леонтьева впервые был предложен А.И. Леонтьевым в 1996 году. В его работах было показано, что разница в температурах торможения и восстановления на стенке трубы создает условия для эффективного теплового взаимодействия между потоками. В дозвуковом канале температура газа близка к температуре торможения, тогда как в сверхзвуковом канале температура стенки значительно ниже. Это позволяет организовать естественный теплообмен между потоками за счет разницы температур, что существенно повышает общую эффективность системы [1].

Ключевым аспектом в процессе стратификации является число Прандтля (Pr), которое характеризует соотношение между кинетической вязкостью и теплопроводностью газа. При значениях числа Прандтля менее 1 (например, для гелия или водорода), эффективность стратификации возрастает, так как разница температур между стенкой и потоком становится более значительной. Это связано с тем, что такие газы обладают высокой теплопроводностью. В работах [2, 3], показано, что при высоких значениях Pr , газодинамическая температурная стратификация не столь эффективна.

В работах [4, 5] показано, что добавление дисперсных частиц в потоки способствует интенсификации теплообмена за счет их инерционного перемещения в турбулентном пограничном слое. Однако в данных исследованиях не учитывается влияние продольного градиента давления, что может существенно повлиять на результаты расчётов.

Кроме того, при увеличении числа Маха в сверхзвуковом канале трубы Леонтьева температурный напор между дозвуковым и сверхзвуковым потоками возрастает, что приводит к значительному увеличению плотности теплового потока [1].

Это объясняется тем, что в сверхзвуковых потоках доминирует аддитивный эффект кинетической энергии, который усиливает процесс охлаждения стенки. Однако, как показали более поздние исследования [6], не учитывалось влияние продольного градиента давления, который может значительно изменять поведение сверхзвукового потока и, соответственно, его влияние на стратификацию. Исследования [2, 7] показали, что для получения оптимального температурного профиля важно учитывать параметры потока, такие как концентрация частиц в дисперсных потоках и турбулентность. Тем не менее, их исследования не охватывают вопросы оптимизации геометрии трубы, что может существенно улучшить тепловую стратификацию.

Процесс теплопередачи в трубе Леонтьева основывается на передаче тепла через тонкую стенку, разделяющую дозвуковой и сверхзвуковой потоки газа. Эффективность этого процесса определяется различием температур между потоками, теплопроводностью стенки, а также ее геометрическими параметрами. В данной части исследуются основные уравнения теплопередачи для различных режимов потока и условия, обеспечивающие оптимальный теплообмен. В основе процесса теплопередачи между дозвуковым и сверхзвуковым потоками в трубе Леонтьева лежит плотность теплового потока (q), которая определяется разницей температур на границах этих потоков:

$$q = k * (T_1 - T_2), \quad (1)$$

где: (q) - плотность теплового потока, (k) - коэффициент теплопередачи через стенку, (T_1) - температура на стенке со стороны дозвукового потока, (T_2) - температура на стенке со стороны сверхзвукового потока.

Для расчета коэффициента теплопередачи (k) используют выражение:

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{a_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{a_2}, \quad (2)$$

где: a_1 и a_2 — коэффициенты теплоотдачи от газа к стенке на дозвуковой и сверхзвуковой сторонах соответственно, δ — толщина стенки, λ — теплопроводность материала стенки.

Исследование [8] показало, что в сверхзвуковом канале a_2 значительно выше, чем a_1 , из-за высоких скоростей и более интенсивного теплообмена. В дозвуковом канале температура газа ближе к температуре торможения, что ограничивает интенсивность передачи тепла. Температурный напор $T_1 - T_2$ увеличивается при уменьшении температуры на стенке сверхзвукового канала T_2 , что ведет к интенсификации стратификации.

Однако не учитывалось влияние инерционного перемещения частиц в дисперсных потоках, которое может оказывать значительное влияние на коэффициент теплоотдачи, особенно в условиях турбулентности. Исследования [4, 5] показали, что при добавлении дисперсных частиц коэффициенты теплопередачи могут существенно изменяться.

Для обеспечения максимальной передачи тепла через стенку важно, чтобы разница температур между дозвуковым и сверхзвуковым потоками была максимальной. Это достигается за счет уменьшения температуры восстановления на стенке сверхзвукового канала и повышения температуры на дозвуковой стороне. Важным условием также является минимизация термического сопротивления стенки, что выражается в повышении теплопроводности материала стенки λ и снижении ее толщины δ [9].

Аналитическое исследование теплопередачи в трубе Леонтьева. Газодинамическая температурная стратификация является сложным процессом, требующим глубокого аналитического подхода для оценки эффективности теплопередачи между дозвуковым и сверхзвуковым потоками газа. Разработка аналитической модели для описания этого процесса позволяет провести исследование условий и параметров, влияющих на эффективность стратификации. Аналитическое решение уравнений теплопередачи в трубе

Леонтьева требует учета различий в термодинамических свойствах дозвукового и сверхзвукового потоков. Для дозвукового потока ($M < 1$) температура торможения T_1 определяется как:

$$T_1 = T_0(1 + 2\gamma - 1M^2), \quad (3)$$

где: T_0 - температура на входе в поток, M - число Маха, γ - показатель адиабаты.

Для сверхзвукового потока ($M > 1$) используется аналогичное уравнение, однако учитываются большие значения числа Маха, что приводит к существенному снижению температуры восстановления на стенке. Число Прандтля Pr , как было рассмотрено ранее, является важным параметром, определяющим соотношение вязкости и теплопроводности газа. Для учета влияния числа Прандтля в расчетах теплопередачи используют следующие уравнения для коэффициента теплоотдачи:

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= C_1 Re^{n_1} Pr^{m_1}, \\ \alpha_2 &= C_2 Re^{n_2} Pr^{m_2}, \end{aligned} \quad (4)$$

где: C_1, C_2 - эмпирические коэффициенты, Re - число Рейнольдса, n_1, n_2 - показатели для зависимости от числа Рейнольдса, m_1, m_2 - показатели для зависимости от числа Прандтля.

Как показано в работах [10-14], при увеличении числа Прандтля эффективность стратификации уменьшается, что связано с более высоким вязкостным сопротивлением газа. Это необходимо учитывать при разработке аналитической модели, особенно для потоков с высокими значениями Pr , таких как воздух.

Процесс теплопередачи в высокоскоростных дисперсных потоках, сопровождаемых продольным градиентом давления, может быть описан с использованием комплексной математической модели, включающей уравнения движения, энергии, а также внутренние источники тепла и количества движения. В данной модели необходимо учитывать влияние дисперсных частиц, которые изменяют структуру и динамику потока, что оказывает влияние на коэффициент восстановления температуры и эффективность теплопередачи. Рассмотрим течение газа с дисперсными частицами в трубе с продольным градиентом давления. Основные уравнения, описывающие движение и теплопередачу, включают:

1. Уравнение движения для газовой фазы:

$$\rho_g \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 u + F_p, \quad (5)$$

где ρ_g - плотность газа, u - скорость потока газа, p - давление, μ - динамическая вязкость, F_p - сила взаимодействия между газом и частицами.

2. Уравнение движения для дисперсной фазы (частиц):

$$\rho_p \frac{du_p}{dt} = \frac{-\nabla p_p}{\rho_p} + F_g + F_c, \quad (6)$$

где ρ_p - плотность частиц, u_p - скорость частиц, F_g - сила сопротивления со стороны газовой фазы, F_c - центробежная сила.

3. Уравнение энергии для газовой фазы:

$$\rho_g c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \cdot \nabla T \right) = \nabla \cdot (k \nabla T) + q_p, \quad (7)$$

где c_p - удельная теплоемкость при постоянном давлении, T - температура газа, k - коэффициент теплопроводности, q_p - источник тепла, обусловленный взаимодействием с частицами.

4. Уравнение энергии для дисперсной фазы:

$$\rho_p c_{p,p} \frac{dT_p}{dt} = -F_g \cdot u_p + q_{p,conv}, \quad (8)$$

где T_p - температура частиц, $c_{p,p}$ - удельная теплоемкость частиц, $q_{p,conv}$ - теплообмен между частицами и газом.

Процесс теплопередачи существенно зависит от ряда ключевых параметров:

1. Влияние продольного градиента давления можно описать следующим уравнением:

$$\frac{dp}{dx} = -\frac{\mu}{D} \cdot \frac{\partial u}{\partial r}, \quad (9)$$

где D - диаметр трубы, u - скорость потока. Увеличение продольного градиента давления способствует снижению коэффициента восстановления температуры и улучшению теплопередачи.

2. Влияние концентрации частиц C_p и их размера dp на теплопередачу выражается через коэффициент теплообмена:

$$Nu_p = C_p \cdot \left(\frac{Re_p^{0.7}}{Pr_p^{0.3}} \right), \quad (10)$$

где Nu_p - число Нуссельта для частиц, Re_p - число Рейнольдса для частиц, Pr_p - число Прандтля для частиц.

При увеличении числа Рейнольдса наблюдается рост числа Нуссельта, что указывает на усиление теплообмена в условиях высокоскоростных потоков (рис. 1).

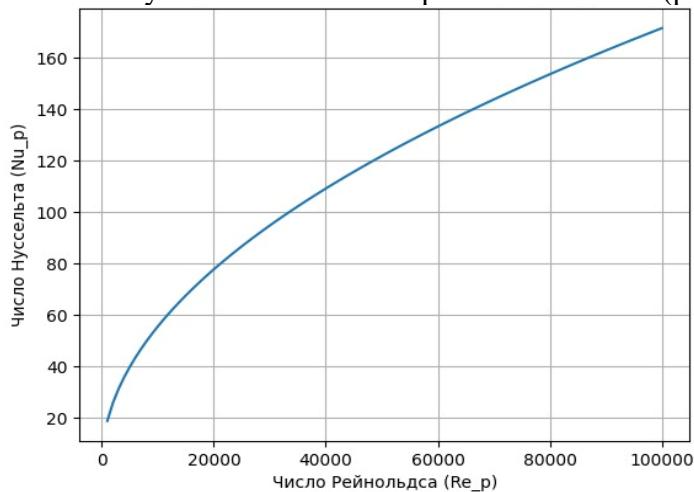


Рис. 1 - Зависимость числа Нуссельта от числа Рейнольдса для дисперсных потоков
Fig. 1 - Dependence of the Nusselt number on the Reynolds number for dispersed flows

Для решения данных уравнений используются численные методы, основанные на разностных сетках. В задачах теплопередачи применяется метод конечных разностей для дискретизации уравнений пограничного слоя. Разностная схема для уравнения энергии в газовой фазе может быть записана следующим образом:

$$T_{i,j}^{n+1} = T_{i,j}^n + \Delta t \left(\frac{k}{\rho_g c_p} \left(\frac{T_{i+1,j}^n - 2T_{i,j}^n + T_{i-1,j}^n}{\Delta x^2} + \frac{T_{i,j+1}^n - 2T_{i,j}^n + T_{i,j-1}^n}{\Delta y^2} \right) + q_p \Delta t \right), \quad (11)$$

где $T_{i,j}^n$ - температура в узле сетки на шаге n , Δt - шаг по времени, $\Delta x, \Delta y$ - шаги по пространству.

Методы конечных разностей позволяют эффективно интегрировать уравнения в областях с высоким градиентом температуры и давления, а также учитывать влияние дисперсных фаз на динамику теплопередачи. В процессе газодинамической стратификации температура на стенке трубы определяется коэффициентом восстановления температуры, который отражает степень разогрева газа при его торможении на стенке. Коэффициент восстановления температуры r определяется следующим уравнением:

$$r = \frac{T_w - T_0}{T_t - T_0}, \quad (12)$$

где: T_w - температура на стенке, T_0 - температура газа на входе в поток, T_t - температура торможения газа.

Коэффициент восстановления r может варьироваться в зависимости от числа Маха и теплопроводности газа. В дозвуковых потоках значение r обычно близко к единице, что указывает на низкую эффективность охлаждения, тогда как в сверхзвуковых потоках r значительно ниже единицы, что приводит к эффективному охлаждению стенки и повышению интенсивности теплопередачи [15-18].

$$r = \frac{1 + \frac{\gamma - 1}{2}}{\gamma Ma^2} M^2, \quad (13)$$

где M - число Маха, а γ - показатель адиабаты.

Эффективность коэффициента восстановления температуры различается для дозвуковых и сверхзвуковых потоков. Для дозвуковых потоков (при $M < 1$) температура на стенке T_w приближается к температуре торможения T_t , что приводит к высоким значениям коэффициента восстановления, близким к 1. Это ограничивает эффективность теплообмена, так как разница температур между стенкой и газом становится минимальной.

В сверхзвуковых потоках (при $M > 1$) температура восстановления на стенке значительно ниже температуры торможения, что способствует более интенсивной стратификации [19-21]. Коэффициент восстановления в этих условиях может быть существенно меньше единицы, что указывает на высокую эффективность охлаждения стенки и усиление теплопередачи. Таким образом, чем выше число Маха, тем ниже значение r , и тем выше эффективность стратификации.

Обсуждение результатов. В рамках настоящего исследования проведено численное моделирование процессов теплопередачи и газодинамической стратификации в трубе Леонтьева с использованием программного комплекса ANSYS Fluent.

Модель построена с использованием модели $k-\omega$, SST (Shear Stress Transport), который обеспечивает точное описание турбулентных течений вблизи стенок. Расчётная сетка состоит из 3 203 044 ячеек, что обеспечивает достаточную точность вычислений. В качестве рабочего вещества использовался метан. Давление на входе - 1,2 МПа, а на выходе для дозвукового и сверхзвукового каналов - 1,1 МПа. Температура на входе - 300 К. Для расчётов использовалась стационарная постановка задачи. На (рис. 2) представлено распределение температуры вдоль оси трубы Леонтьева.

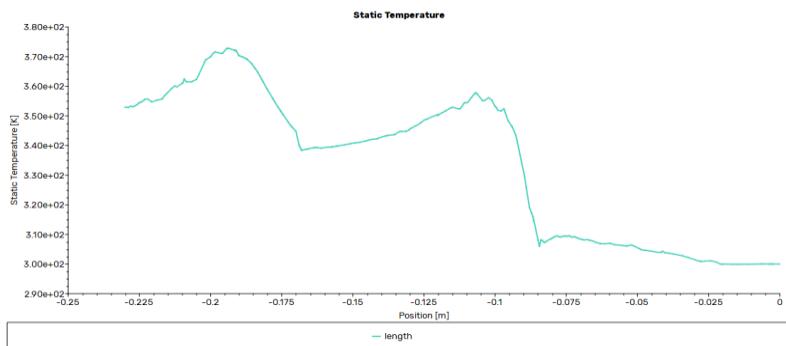


Рис. 2 - Изменения температуры газа вдоль оси трубы Леонтьева
 Fig. 2 - Changes in gas temperature along the axis of the Leontiev tube

Контурное распределение температуры (рис. 3) позволяет более наглядно увидеть температурные изменения в различных зонах трубы, включая зону взаимодействия дозвукового и сверхзвукового потоков. Отчётливо видно, что в сверхзвуковом канале температура газа заметно выше, чем на входе, что обусловлено термодинамическими особенностями потока в этом режиме.

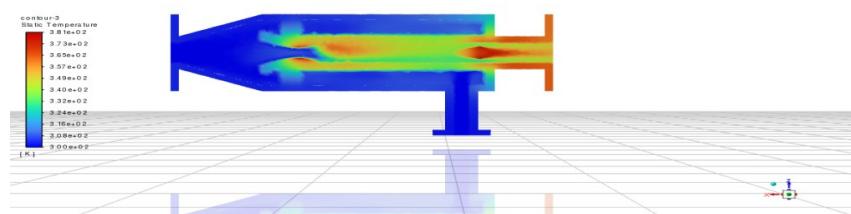


Рис. 3 - Температурное поле в трубе Леонтьева
 Fig. 3 - Temperature field in the Leontiev tube

На основании анализа турбулентной кинетической энергии (рис. 4) можно отметить, что её уровень значительно возрастает в зоне сверхзвукового сопла, где происходят интенсивные процессы перемешивания и теплопередачи.

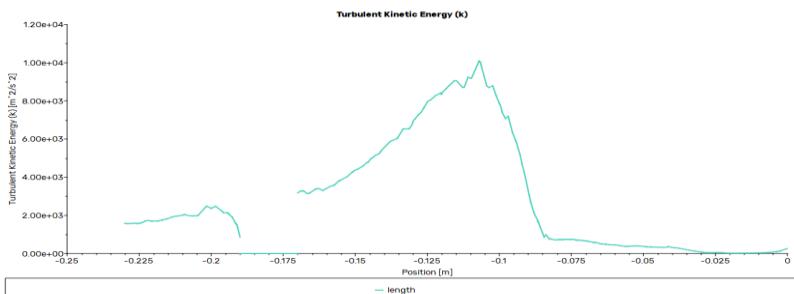


Рис. 4 - Распределение турбулентной кинетической энергии
Fig. 4 - Distribution of turbulent kinetic energy

Контурная карта распределения скорости (рис.5) показывает резкое увеличение скорости газа в сверхзвуковом канале и относительно стабильное распределение скорости в дозвуковом канале, что создаёт благоприятные условия для эффективного теплообмена.

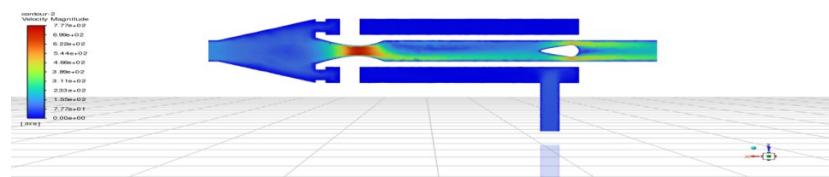


Рис. 5 - Распределение скорости газа в трубе Леонтьева
Fig. 5 - Distribution of gas velocity in the Leontiev tube

Результаты численного моделирования подтверждают, что область сверхзвукового сопла является ключевой зоной, где происходит наиболее интенсивная стратификация, что сопровождается увеличением турбулентности и теплопередачи. Установлено, что повышение давления на входе усиливает охлаждение газа в сверхзвуковом канале, а также увеличивает эффективность теплообмена между дозвуковым и сверхзвуковым потоками.

Вывод. В ходе исследования подтверждена высокая эффективность газодинамической температурной стратификации для улучшения процессов теплообмена в системах, работающих с газовыми потоками.

Проведено аналитическое исследование теплопередачи в трубе Леонтьева, позволяющее оценить влияние ключевых параметров, таких как температурный напор, числа Прандтля и Маха, а также продольный градиент давления, на эффективность температурной стратификации.

Выявлено, что снижение температуры восстановления на стенке сверхзвукового канала и повышение температуры на дозвуковой стороне значительно увеличивает плотность теплового потока, что способствует снижению энергетических затрат.

В ходе численного моделирования наблюдаются следующие ключевые закономерности:

1. Эффективность стратификации напрямую зависит от разности температур и давления между дозвуковым и сверхзвуковым потоками.
2. Увеличение турбулентной энергии вблизи зоны взаимодействия потоков усиливает теплообмен, что способствует более равномерному перераспределению температуры.
3. Использование модели $k-\omega$, SST позволяет точно оценить процессы тепло-массопереноса в сложных условиях.

Таким образом газодинамическая температурная стратификация имеет перспективное применение в промышленных системах охлаждения, теплообменниках и устройствах рекуперации тепла.

Библиографический список:

1. Леонтьев А.И. Газодинамический метод энергоразделения газовых потоков // ТВТ. 1997. Т. 35. № 1. С. 157
2. Цветова Е.В. Моделирование и исследование процесса газодинамической температурной стратификации для повышения эффективности редуцирования природного газа/Е.В. Цветова, В.Н. Ковальнов, Ю.А. Хахалев//Информатика, вычислительная техника и управление – 2021. – № 2. – С. 54-58.
3. Цынаева А.Л., Цынаева Е.А., Школин Е.В. Исследование методов интенсификации теплообмена в трубе температурной стратификации // Изв. вузов. Авиационная техника. 2013. № 4. С. 44 46.
4. Ковальнов Н.Н., Фокеева Е.В. Повышение эффективности газодинамической температурной стратификации за счет использования дисперсного рабочего тела // Материалы V Международной научно-технической конференции «Современные научно-технические проблемы транспорта». Ульяновск, 2009. С. 64 – 67.
5. Температурная стратификация в сверхзвуковом дисперсном потоке / Н.Н. Ковальнов, Л.М. Магазинник, Е.В. Фокеева, М.А. Кузьмина // Труды XVII Школы-семинара молодых специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева. М.: Изд-во МЭИ. 2009. Т.2. С. 213 – 216.
6. Карпухина Т.В., Ковальнов В.Н., Цветова Е.В. Повышение эффективности температурной стратификации отработанного сушильного агента//Вестник научных исследований. 2019. Т. 2, № 3. С. 50-57.
7. Таракевич С.Э., Филин В.4., Щукин В.К. Теплоотдача дисперсного потока на непроницаемой и проницаемой стенках плоского асимметричного сопла//Изв. вузов. Авиационная техника. 2001. №1. С.47-50.
8. Хазов Д.Э. Моделирование течения в плоском канале при наличии тренировок и теплообмена // Труды XV Школы-семинары молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева. В 2-х томах. Т. 1. Калуга. 23-27 мая 2005 г. М.: Изд-во МЭИ. 2005. С. 121-124
9. Цынаева А.Л., Цынаева Е.А., Школин Е.В. Исследование методов интенсификации теплообмена в трубе температурной стратификации // Изв. вузов. Авиационная техника. 2013. № 4. С. 44 46.
10. Олимпиев В.В. Поверхности теплообмена с интенсифицированной теплоотдачей и пониженным сопротивлением // Изв. вузов. Авиационная техника. 2000. № 3. С. 35-38.
11. Попович С.С., Виноградов Ю.4., Стронгин М.М. Экспериментальное исследование возможности интенсификации теплообмена в устройстве безмашинного энергоразделения потоков // Вестник СГАУ. 2015. Т. 14. №2. С. 159-169.
12. Таракевич С.Э., Филин В.4., Щукин В.К. Теплоотдача дисперсного потока на непроницаемой и проницаемой стенках плоского асимметричного сопла//Изв. вузов. Авиационная техника. 2001. №1. С. 47-50.
13. Gifford W.E., Longsworth Pulse-tube Refrigeration // Journal of Manufacturing Science and Engineering. 1964. ol. 86. Iss. 3. P. 264-268.
14. Керн Д., Краус А. Развитые поверхности теплообмена. М.: Энергия, 1977. 464 с
15. Hall I.M., Berry On the Heating Effect in a Resonance tube//Journal of the Aerospace Sciences. 1959.26. 253.
16. Цынаева А.А. Моделирование системы комбинированного охлаждения лопаток турбомашин с вихревым энергоразделителем: Автореф, дис. .. канд, техн. наук. Ульяновск: УлГТУ, 2004. 19 с.
17. Ковальнов Н.Н. Выбор оптимальных параметров процесса газодинамической температурной стратификации в сверхзвуковом газовом потоке // Изв. вузов. Авиационная техника. 2010.- №3.-С. 28-31.
18. Leont'ev A. I. Temperature stratification of supersonic gas flow // Doklady Physics. 1997;42(6):309–311.
19. Цынаева А.А., Цынаева Е.А., Школин Е.В. Об использовании тепловых труб для повышения эффективности газодинамической температурной стратификации // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. — 2013. — № 3 (41). — Часть 2. — С. 192-197.
20. Попович С.С., Виноградов Ю.4., Стронгин М.М. Экспериментальное исследование возможности интенсификации теплообмена в устройстве безмашинного энергоразделения потоков // Вестник СГАУ. 2015. Т. 14. № 2. С. 159-169.
21. Бурцев С.А. Исследование путей повышения эффективности газодинамического энергоразделения // Теплофизика высоких температур — 2014 — Т.52, №1. — С. 14–21.

References:

1. Leont'ev A.I. Gas-dynamic method of energy separation of gas flows. *High Temperature*. 1997;35(1):157 (In Russ).
2. Tsvetova E.V., Modeling and study of the process of gas-dynamic temperature stratification for improving the efficiency of natural gas reduction. E.V. Tsvetova, V.N. Kovalenogov, Yu.A. Khakhalev. *Informatics, Computer Engineering, and Control*. 2021;2:54–58. (In Russ).
3. Tsynaeva A.L., Tsynaeva E.A., Shkolin E.V. Study of methods for intensifying heat transfer in a temperature stratification pipe. *University Proceedings. Aviation Technology*. 2013;4:44–46. (In Russ).
4. Kovalenogov N.N., Fokeeva E.V. Increasing the efficiency of gas-dynamic temperature stratification by using dispersed working substances. *Proceedings of the V International Scientific and Technical Conference "Modern Scientific and Technical Transport Problems*. Ulyanovsk, 2009: 64–67. (In Russ).

5. Temperature stratification in a supersonic dispersed flow. N.N. Kovalenogov, L.M. Magazinnik, E.V. Fokeeva, M.A. Kuzmina. *Proceedings of the XVII School-Seminar for Young Scientists under the leadership of RAS Academician A.I. Leont'ev. M.: MEI Publishing.* 2009; 2:213–216. (In Russ).
6. Karpukhina T.V., Kovalenogov V.N., Tsvetova E.V. Improving the efficiency of temperature stratification of exhaust drying agents. *Bulletin of Scientific Research.* 2019; 2(3):50–57. (In Russ).
7. Tarasevich S.E., Filin V.A., Shchukin V.K. Heat transfer of a dispersed flow on impermeable and permeable walls of a flat asymmetric nozzle. *University Proceedings. Aviation Technology.* 2001;1:47–50.(In Russ).
8. Khazov D.E. Modeling of flow in a flat channel with friction and heat transfer. *Proceedings of the XV School-Seminar for Young Scientists and Specialists under the leadership of RAS Academician A.I. Leont'ev.* In two volumes. Kaluga. May 23–27, M.: MEI Publishing. 2005; 1:121–124. (In Russ).
9. Tsynaeva A.L., Tsynaeva E.A., Shkolin E.V. Study of methods for intensifying heat transfer in a temperature stratification pipe. *University Proceedings. Aviation Technology.* 2013;4:44–46. (In Russ).
10. Olympiev V.V. Heat transfer surfaces with enhanced heat dissipation and reduced resistance. *University Proceedings. Aviation Technology.* 2000; 3: 35–38. (In Russ).
11. Popovich S.S., Vinogradov Yu.A., Strongin M.M. Experimental study of the possibility of intensifying heat transfer in a non-mechanical energy separation device. *Bulletin of SSAU.* 2015;14(2):159–169. (In Russ).
12. Tarasevich S.E., Filin V.A., Shchukin V.K. Heat transfer of a dispersed flow on impermeable and permeable walls of a flat asymmetric nozzle. *University Proceedings. Aviation Technology.* 2001;1: 47–50. (In Russ).
13. Gifford W.E., Longsworth. Pulse-tube Refrigeration. *Journal of Manufacturing Science and Engineering.* 1964;86(3)264–268.
14. Kern D., Kraus A. Enhanced Heat Transfer Surfaces. M.: Energy, 1977: 464. (In Russ).
15. Hall I.M., Berry. On the Heating Effect in a Resonance Tube. *Journal of the Aerospace Sciences.* 1959;26: 253.
16. Tsynaeva A.A. Modeling of a combined cooling system for turbine blades with a vortex energy separator: Abstract of dissertation for the degree of candidate of technical sciences. Ulyanovsk: Ulyanovsk State Technical University, 2004;19. (In Russ).
17. Kovalenogov N.N. Selection of optimal parameters for the process of gas-dynamic temperature stratification in a supersonic gas flow. *University Proceedings. Aviation Technology.* 2010;3:28–31. (In Russ).
18. Leont'ev A.I. Temperature stratification of supersonic gas flow. *Doklady Physics.* 1997;42(6):309–311.
19. Tsynaeva A.A., Tsynaeva E.A., Shkolin E.V. On the use of heat pipes to improve the efficiency of gas-dynamic temperature stratification. *Bulletin of the Samara State Aerospace University.* 2013;3 (41) Part 2: 192–197. (In Russ).
20. Popovich S.S., Vinogradov Yu.A., Strongin M.M. Experimental study of the possibility of intensifying heat transfer in a non-mechanical energy separation device. *Bulletin of SSAU.* 2015; 14(2):159–169. (In Russ)
21. Burtsev S.A. Study of ways to improve the efficiency of gas-dynamic energy separation. *High Temperature Physics.* 2014;52(1):14–21 (In Russ).

Сведения об авторах:

Рудник Роман Сергеевич, аспирант, кафедра «Тепловая и топливная энергетика», kuvaldatmb99@gmail.com.

Матвеев Александр Федорович, аспирант, кафедра «Тепловая и топливная энергетика», mafij78@mail.ru

Ковалногов Владислав Николаевич, доктор технических наук, профессор, кафедра «Тепловая и топливная энергетика», kvn@ulstu.ru

Information about the authors:

Roman S. Rudnik, PhD student, Department of Thermal and Fuel Energy, kuvaldatmb99@gmail.com

Alexander F. Matveev, PhD student, Department of Thermal and Fuel Energy, mafij78@mail.ru

Vladislav N. Kovalnogov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Department of Thermal and Fuel Energy, kvn@ulstu.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/ Received 17.11.2024.

Одобрена после рецензирования/ Reviced 22.12.2024.

Принята в печать/ Accepted for publication 20.01.2025.

ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА
ENERGY AND ELECTRICAL ENGINEERING

УДК 637.14

DOI: 10.21822/2073-6185-2025-52-1-22-30

Оригинальная статья /Original article



**Оценка влияния интенсификаторов теплообмена
на энергомассовую эффективность кристаллизаторов**

В.В. Чернявская, В.Б. Сапожников, И.Ю. Голованов, М.А. Угольникова

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

Резюме. Цель. Целью исследования является оценка наличия и формы интенсификаторов теплообмена в кристаллизаторе объемного типа конструкции «труба в трубе».

Метод. Исследование основано на методах термодинамического анализа, натурного и вычислительного моделирования процессов с использованием компьютерного моделирования.

Результат. Показано, что наиболее важным параметром теплообменных аппаратов, вне зависимости от протекающего в них процесса, является количество передаваемой теплоты в единицу времени, то есть тепловая мощность, которая прямо пропорциональна площади поверхности теплообмена. Представлены результаты оценки влияния наличия и формы интенсификаторов теплообмена на удельную массу кристаллизатора и мощность, требуемую для перекачки хладоносителя (применительно к ёмкостному типу конструкции с намораживанием льда на внутренней поверхности теплообменной трубы) на основании результатов компьютерного моделирования. **Вывод.** Получены две формы интенсификаторов теплообмена, обеспечивающих минимальные значения представленных показателей энергомассовой эффективности кристаллизатора.

Ключевые слова: теплообменный аппарат, конструкция типа «труба в трубе», интенсификаторы теплообмена, кристаллизатор, энергомассовая эффективность

Для цитирования: В.В.Чернявская, В.Б.Сапожников, И.Ю.Голованов, М.А.Угольникова. Оценка влияния интенсификаторов теплообмена на энергомассовую эффективность кристаллизаторов. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025;52(1):22-30. DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-1-22-30

**Assessment of the effect of heat transfer intensifiers
on the energy and mass efficiency of crystallizers**

V.V. Chernyavskaya, V.B. Sapozhnikov, I.Yu. Golovanov, M.A. Ugolnikova

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

Abstract. Objective. The aim of the study is to assess the presence and form of heat transfer intensifiers in a volumetric crystallizer of the "pipe in a pipe" design. **Method.** The study is based on the method of thermodynamic analysis, natural and computational modeling of processes using computer modeling. **Result.** It is shown that the most important parameter of heat exchangers (regardless of the process) is the amount of heat transferred per unit of time (thermal power, which is directly proportional to the surface area of the heat exchange). The article presents the results of evaluating the effect of the presence and form of heat transfer intensifiers on the mass of the Crystallizer and the power required for pumping the coolant (when freezing ice on the inner surface of the heat exchanger tube) based on the results of computer modeling. **Conclusion.** Two forms of heat transfer intensifiers providing the best energy and mass efficiency of crystallizers are presented.

Keywords: heat exchanger, pipe-in-pipe design, heat transfer intensifiers, crystallizer, energy and mass efficiency.

For citation: V.V. Chernyavskaya, V.B. Sapozhnikov, I.Yu. Golovanov, M.A. Ugolnikova. Assessment of the effect of heat transfer intensifiers on the energy and mass efficiency of crystallizers. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2025;52(1):22-30. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-1-22-30

Введение. В настоящее время актуальной задачей для всех отраслей промышленности является совершенствование теплообменных аппаратов. Одним из распространённых типов теплообменных аппаратов являются конструкции типа «труба в трубе», которые могут использоваться при проведении процессов нагрева, охлаждения, конденсации и кристаллизации различных рабочих сред.

Конструкция типа «труба в трубе» широко распространена во всех отраслях промышленности ввиду своей простоты и надёжности. Такая конструкция может использоваться при реализации процессов, включающих, в том числе, фазовый переход рабочих сред, что позволяет применять теплообменный аппарат для их конденсации и кристаллизации. Следовательно, в подобных конструкциях возможно проводить намораживание льда на внутренней поверхности теплообменной трубы, что делает их подходящими для использования в качестве кристаллизатора в ледогенераторах и криоконцентраторах.

Постановка задачи. Типовая конструкция неразборного двухтрубного теплообменного аппарата типа «труба в трубе» представлена на рис. 1 [1-3].

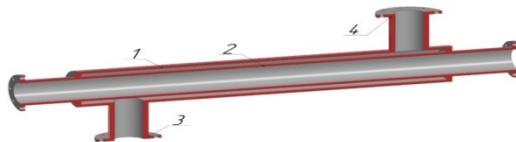


Рис. 1 - Типовая конструкция теплообменного аппарата типа «труба в трубе»:
1 – Кожуховая труба; 2 – Теплообменная труба; 3 – Патрубок входа второго теплоносителя;
4 – Патрубок выхода второго теплоносителя

Fig. 1 -Typical design of a "pipe in a pipe" type heat exchanger: 1 – Casing pipe; 2 – Heat exchange pipe; 3 – Inlet pipe of the second coolant; 4 – Outlet pipe of the second coolant

Данный аппарат работает следующим образом: в трубу 2 подается первый теплоноситель, затем через патрубок входа второго теплоносителя 3 в кожуховую трубу 1 подается второй теплоноситель, который после прохода по межтрубному пространству выводится через патрубок выхода второго теплоносителя 4. В результате чего происходит теплообмен между первым и вторым теплоносителями через теплообменную трубу 2.

При разработке новых и совершенствовании известных теплообменных аппаратов наибольшее внимание уделяется увеличению их теплообменной мощности при заданных габаритных размерах конструкции [4]:

$$Q = K \cdot F \cdot \Delta t, \quad (1)$$

где Q – теплообменная мощность аппарата, Вт; K – коэффициент теплопередачи, Вт/($\text{м}^2 \cdot \text{K}$); F – площадь поверхности теплообмена, м^2 ; Δt – средняя разность температур между горячим и холодным теплоносителями, К.

В ряде патентов CN101566437A, CN117804079A, GB1056075A, RU149737U1, US2012199326A1, US3612002A и статьях [5-10] предлагается интенсификация процесса теплообмена между теплоносителями путём закрепления на поверхности теплообменной трубы «интенсификаторов теплообмена» – элементов различной формы, например, стержней. Такое решение позволяет увеличить площадь поверхности теплообмена F (и, следовательно, увеличить теплообменную мощность Q) без увеличения габаритов теплообменного аппарата (конструкция становится компактнее). Интенсификаторы могут быть расположены как на внешней, так и на внутренней поверхности теплообменной трубы. Недостатками наличия интенсификаторов в конструкции теплообменного аппарата являются увеличение его массы и возрастание затрат энергии на перекачку теплоносителей при его эксплуатации.

Методы исследования. Оценить рациональность решения по повышению эффективности работы теплообменного аппарата можно как по результатам натурных экспериментов (включая исследования на действующих образцах), так и с использованием компьютерного моделирования [11-19]. При этом стоит учитывать, что точность компьютерного моделирования снижается при наличии фазового перехода теплоносителей в аппарате. Следовательно, для оценки эффективности работы теплообменных аппаратов с фазовым переходом, целесообразно проведение натурного эксперимента. Однако, компьютерное моделирование позволяет дать предварительную оценку целесообразности применения конкретной конструкции аппарата в заданных условиях эксплуатации.

Например, с высокой точностью может быть определена мощность, требуемая для перекачки теплоносителя, не совершающего фазовый переход. В качестве критериев предварительной оценки могут быть использованы удельные показатели, характеризующие энергомассовую эффективность конструкции теплообменного аппарата [20-21]:

– отношение мощности, требуемой для перекачки теплоносителя при эксплуатации теплообменного аппарата, к его площади поверхности теплообмена:

$$W_3 = \frac{W}{F}, \quad (2)$$

где W_3 – удельная мощность, требуемая для перекачки теплоносителя при эксплуатации теплообменного аппарата при его заданной площади поверхности теплообмена (из условия необходимой тепловой мощности Q), Вт/м²; W – мощность, требуемая для перекачки теплоносителя при эксплуатации теплообменного аппарата, Вт.

– отношение массы теплообменного аппарата к его площади поверхности теплообмена:

$$m_3 = \frac{m}{F}, \quad (3)$$

где m_3 – массовая эффективность (масса, необходимая для получения единицы площади поверхности теплообмена в теплообменном аппарате), кг/м²; m – масса теплообменного аппарата, кг.

Очевидно, что оба этих показателя для повышения энергомассовой эффективности теплообменника при заданной тепловой мощности следует минимизировать.

Проведём оценку энергомассовой эффективности с использованием компьютерного моделирования в программном комплексе «SolidWorks» типового теплообменного аппарата (рис. 1) при использовании в качестве кристаллизатора в ледогенераторах и крио-концентраторах с намораживанием льда на внутренней поверхности теплообменной трубы. Фазовый переход (а именно, кристаллизация исходного продукта) будет проходить только внутри теплообменной трубы.

Следовательно, энергоэффективность кристаллизатора по показателю W_3 (2) можно оценить, приняв W как мощность, требуемую для перекачки хладоносителя в межтрубном пространстве и определяемую по известной формуле [4]:

$$W = V \cdot \Delta P, \quad (4)$$

где V – объёмный расход хладоносителя в межтрубном пространстве, м³/с; ΔP – гидравлическое сопротивление при движении хладоносителя в межтрубном пространстве, Па.

При моделировании используем следующие конструктивные параметры кристаллизатора: конструкция расположена горизонтально; кожуховая труба Ø57×4 мм имеет длину 1400 мм; теплообменная труба Ø25×3 мм имеет длину 1500 мм; патрубки межтрубного пространства выполнены длиной 155 мм из трубы Ø32×4 мм; длина охлаждающей части теплообменной трубы – 1400 мм; материал кристаллизатора – сталь марки 08Х18Н10Т (AISI 304) с плотностью 7740 кг/м³. Тогда получаем площадь поверхности теплообмена F – 0,110 м²; масса кристаллизатора – 10,49 кг.

Зададим исходные данные для компьютерного моделирования: плотность хладоносителя межтрубного пространства – 998 кг/м³; скорость хладоносителя на входе

в межтрубное пространство – 1,0 м/с. С учётом конструктивных параметров кристаллизатора объёмный расход хладоносителя в межтрубном пространстве V составит $4,506 \cdot 10^4 \text{ м}^3/\text{с}$.

Обсуждение результатов. По результатам компьютерного моделирования получаем гидравлическое сопротивление в межтрубном пространстве ΔP – 1137 Па. Мощность, требуемая для перекачки хладоносителя W (4), равна 0,513 Вт. Из полученных данных следует, что энергоэффективность $W_{\text{э}}$ (2) типовой конструкции кристаллизатора составляет 4,661 Вт/м²; массовая эффективность $m_{\text{э}}$ (3) равна 95,41 кг/м².

На рис. 2 представлено распределение скорости хладоносителя в межтрубном пространстве кристаллизатора.

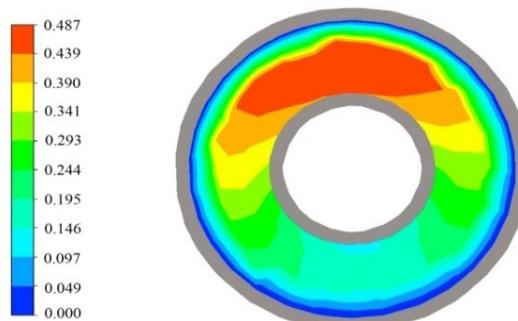


Рис. 2 - Распределение скорости хладоносителя в поперечном сечении типовой конструкции кристаллизатора (м/с)

Fig. 2 - Distribution of coolant velocity in the cross section of a typical crystallizer design (m/s)

Из рис. 2 можно сделать вывод о неравномерности движения хладоносителя по поперечному сечению кристаллизатора. Данный фактор может негативно сказываться как на потерях энергии W , так и на интенсивности теплообмена в кристаллизаторе.

Важной задачей для промышленности является разработка решений, направленных на повышение энергомассовой эффективности оборудования [22-25], в частности по удельным показателям $W_{\text{э}}$ (2) и $m_{\text{э}}$ (3). В кристаллизаторах конструкции типа «труба в трубе» улучшение этих показателей одновременно с выравниванием скорости хладоносителя в межтрубном пространстве может быть достигнуто путём снабжения поверхности теплообмена интенсификаторами теплообмена. Так как наличие интенсификаторов на внутренней поверхности теплообменной трубы будет затруднять извлечение льда из кристаллизатора, снабдим интенсификаторами типовую конструкцию (рис. 1) только по наружной поверхности теплообменной трубы.

В качестве интенсификаторов теплообмена рассмотрим стержни с формой поперечного сечения по патентам RU135101U1, RU226381U1, RU227391U1, а также квадратной формы, вписанных в окружность диаметром 6 мм (рис. 3).

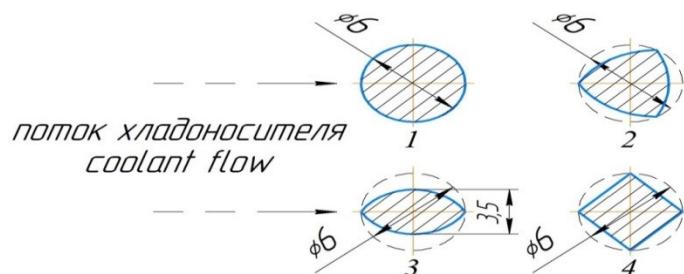


Рис. 3 - Форма поперечного сечения стержней-интенсификаторов теплообмена:
1 – По патенту RU135101U1; 2 – По патенту RU226381U1; 3 – По патенту RU227391U1;
4 – Квадратной формы

Fig. 3 - The form of the cross-section of the heat transfer intensifier rods:

- 1 – According to patent RU135101U1; 2 – According to patent RU226381U1;**
- 3 – According to patent RU227391U1; 4 – Square form**

Для проведения компьютерного моделирования примем следующие конструктивные параметры кристаллизаторов с интенсификаторами теплообмена: высота стержней 6 мм (половина расстояния между наружной поверхностью стенки теплообменной трубы и внутренней поверхностью стенки кожуховой трубы); стержни расположены по всей длине теплообменной трубы с расстоянием между их центрами равным 50 мм; общее количество стержней – 108 шт.

Компьютерное моделирование конструкций с интенсификаторами будем проводить с материалом кристаллизатора и объёмным расходом хладоносителя V , соответствующими данным при моделировании типовой конструкции.

В патенте RU135101U1 (рис. 3, а) предлагаются интенсификаторы теплообмена в виде стержней круглого поперечного сечения. Тогда площадь поверхности теплообмена составит $F = 0,122 \text{ м}^2$, а масса кристаллизатора – 10,64 кг.

По результатам компьютерного моделирования конструкции по патенту RU135101U1 получаем ΔP равное 1261 Па. Энергоэффективность $W_{\text{э}}$ (2) составляет 4,635 Вт/м²; а массовая эффективность $m_{\text{э}}$ (3) – 86,75 кг/м².

Изменим форму поперечного сечения стержней с круглой на треугольник Рёло, согласно патенту RU226381U1 (рис. 3, б). Тогда площадь поверхности теплообмена F составит 0,120 м², а масса кристаллизатора будет равна 10,59 кг.

Получаем гидравлическое сопротивление в межтрубном пространстве ΔP равное 1248 Па. Энергоэффективность $W_{\text{э}}$ (2) кристаллизатора по патенту RU226381U1 равна 4,656 Вт/м²; а массовая эффективность $m_{\text{э}}$ (3) – 87,67 кг/м².

Далее проведём моделирование конструкции с поперечным сечением стержня-интенсификатора, полученным путём объединения двух треугольников Рёло до формы, близкой к ромбической, согласно патенту RU227391U1 (рис. 3, в). Тогда площадь поверхности теплообмена F составит 0,119 м², а масса кристаллизатора – 10,57 кг.

Гидравлическое сопротивление в межтрубном пространстве ΔP кристаллизатора по патенту RU227391U1 равно 1176 Па. Энергоэффективность $W_{\text{э}}$ (2) составляет 4,436 Вт/м²; а массовая эффективность $m_{\text{э}}$ (3) – 88,43 кг/м².

Рассмотрим также квадратную форму поперечного сечения стержня (рис. 3, г). Тогда площадь поверхности теплообмена составит $F = 0,121 \text{ м}^2$, а масса – 10,58 кг.

Гидравлическое сопротивление в межтрубном пространстве ΔP составляет 1318 Па. Энергоэффективность $W_{\text{э}}$ (2) равна 4,901 Вт/м²; а массовая эффективность $m_{\text{э}}$ (3) – 87,29 кг/м². Для удобства представим полученные результаты в табл.1.

Таблица 1. Показатели энергомассовой эффективности кристаллизаторов
Table 1. Indicators of energy and mass efficiency of crystallizers

Удельный показатель Specific indicator	Типовая конструкция Typical design	Форма поперечного сечения стержня-интенсификатора теплообмена Cross-sectional shape of heat exchange intensifier rod			
		Круглая Round	Треугольник Рёло Reuleaux triangle	Ромбическая из двух треугольников Рёло Rhombic of two Reuleaux triangles	Квадратная Square
$W_{\text{э}}$ (2), Вт/м ²	4,661	4,635	4,656	4,436	4,901
$m_{\text{э}}$ (3), кг/м ²	95,41	86,75	87,67	88,43	87,29

На основании проведённого компьютерного моделирования наилучшим показателем энергоэффективности $W_{\text{э}}$ (2) обладает конструкция кристаллизатора с интенсификаторами теплообмена по патенту RU227391U1 (рис. 3, в).

В сравнении с типовой конструкцией преимущество такого кристаллизатора по данному показателю составляет 4,83%.

Аналогичное сравнение рассмотренных кристаллизаторов по показателю массовой эффективности $m_{\text{э}}$ (3) показывает улучшение на 9,08% в конструкции, снабжённой стержнями-интенсификаторами по патенту RU135101U1 (рис. 3, а), в сравнении с типовой конструкцией.

На рис. 4 представлено распределение скорости хладоносителя в рассмотренных кристаллизаторах с интенсификаторами (поперечное сечение по центру конструкций). Из рис. 4 следует, что снабжение типовой конструкции кристаллизатора интенсификаторами теплообмена в виде стержней способствует выравниванию распределения скорости хладоносителя в межтрубном пространстве.

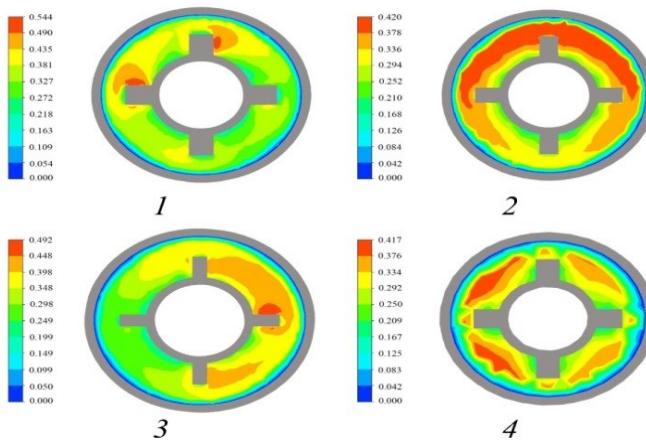


Рис. 4 - Распределение скорости хладоносителя в поперечном сечении кристаллизатора с формой интенсификаторов теплообмена (м/с): 1 – По патенту RU135101U1; 2 – По патенту RU226381U1; 3 – По патенту RU227391U1; 4 – Квадратной

Fig. 4 - Distribution of the coolant velocity in the cross section of the crystallizer with the form of heat transfer intensifiers (m/s): 1 – According to patent RU135101U1; 2 – According to patent RU226381U1; 3 – According to patent RU227391U1; 4 – Square form

Наиболее равномерное распределение скорости хладоносителя наблюдается в конструкции по патенту RU135101U1 (стержни-интенсификаторы круглого поперечного сечения), что может положительно отразиться на интенсивности теплообмена в кристаллизаторе.

Вывод. С использованием компьютерного моделирования проведена оценка влияния наличия интенсификаторов теплообмена на энергомассовую эффективность кристаллизатора, на примере снабжения типовой конструкции типа «труба в трубе» стержнями различной формы поперечного сечения.

Оценка проведена по двум удельным показателям, характеризующим затраты массы на изготовление кристаллизатора к получаемой площади поверхности теплообмена ($m_{\text{э}}$) и отношение мощности, требуемой для перекачки хладоносителя в межтрубном пространстве при эксплуатации кристаллизатора к площади его поверхности теплообмена ($W_{\text{э}}$). Очевидно, что для повышения энергомассовой эффективности теплообменника при заданной тепловой мощности оба этих показателя следует минимизировать.

Результаты компьютерного моделирования горизонтально расположенного кристаллизатора показали, что наличие стержней в конструкции выравнивает распределение скорости хладоносителя в его межтрубном пространстве, что, в свою очередь, ведет к улучшению рассмотренных удельных показателей, и по показателю $W_{\text{э}}$ минимальное значение достигается в кристаллизаторе по патенту RU227391U1. Минимальному значению $m_{\text{э}}$ соответствует конструкция по патенту RU135101U1.

Отметим, что расположение кристаллизаторов не окажет существенного влияния на рассмотренный удельный показатель $W_{\text{э}}$, а показатель $m_{\text{э}}$ не изменится.

Таким образом, мы получили два типа интенсификаторов, обеспечивающих минимальные значения предлагаемых показателей энергомассовой эффективности теплообменных аппаратов.

Однако при выборе наиболее рациональной формы интенсификаторов теплообмена для повышения энергомассовой эффективности кристаллизатора, по нашему мнению, следует отдавать предпочтение минимизации показателя $W_{\text{э}}$.

Библиографический список:

1. Попов И.А., Махянов Х.М., Гуреев В.М. Физические основы и промышленное применение интенсификации теплообмена. Интенсификация теплообмена. Казань: Центр инновационных технологий. 2009. 560 с.
2. Ugolnikova M.A., Chernyavskaya V.V. Dynamics of water ice formation during the operation of vessel cryoconcentrators. Chemical and Petroleum Engineering. 2021. Vol. 57 (7–8). P. 561–566.
3. Sapozhnikov V.B., Ugolnikova M.A., Chernyavskaya V.V. Evaluating the performance of low-temperature liquid separation devices with two-stage refrigeration and pre-cooling. Chemical and Petroleum Engineering. 2023. Vol. 59 (1–2). P. 134–138.
4. Lagutkin M.G., Baranova E.Yu., Mishachkin D.I., Naumov V.N. Increasing efficiency of shell-and-tube heat exchanger taking account of energy consumption reduction. Chemical and Petroleum Engineering. 2022. Vol. 57 (9–10). P. 713–719.
5. Филиппов В.В. Совершенствование конструкции теплообменных установок на основе методов интенсификации теплообмена. Тенденции развития науки и образования. 2023. № 100. т. 5. С. 130–132.
6. Кобзева А.А., Ву С.К., Глазов В.С. Особенности теплоотдачи в канале, стени которого имеют разные температуры и интенсификаторы теплообмена. Энергосбережение – теория и практика: статья в сборнике научных трудов Одиннадцатой Всероссийской конференции с Международным участием. 2022. С. 173–176.
7. Бурцев С.А., Виноградов Ю.А., Киселёв Н.А., Стронгин М.М. Выбор рациональных интенсификаторов теплообмена в теплообменном оборудовании. Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2016. № 12. С. 35–56.
8. Mehrjardi S.A.A., Khademi A., Said Z., Ushak S., Chamkha A.J. Effect of elliptical dimples on heat transfer performance in a shell and tube heat exchanger. Heat and Mass Transfer. 2023. Vol. 59 (10). P. 1781–1791.
9. Bhattacharyya S., Vishwakarma D.K., Srinivasan A., Soni M.K., Goel V., Sharifpur M., Meyer J., Ahmadi M.H., Issakhov A. Thermal performance enhancement in heat exchangers using active and passive techniques: a detailed review. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2022. Vol. 147 (17). P. 9229–9281.
10. Alfellag M.A., Ahmed H.E., Jehad M.G., Farhan A.A. The hydrothermal performance enhancement techniques of corrugated channels: a review. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2022. Vol. 147 (19). P. 10177–10206.
11. Лобанов И.Е. Моделирование течения и теплообмена в трубах с турбулизаторами вязких теплоносителей в ламинарной области, а также в области перехода к турбулентному течению. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023. № 50 (3). С. 24–36.
12. Гильфанов К.Х., Шакиров Р.А. Нейросетевое моделирование теплообменных характеристик при поверхностной интенсификации теплообменного оборудования. Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2020. № 76 (4). С. 5–11.
13. Соловьев С.В., Чернышев А.В. Моделирование теплообмена жидкости в сферическом слое. Южно-Сибирский научный вестник. 2019. № 1 (25). С. 114–122.
14. Ходяшов Е.О., Тюрин М.П., Седляров О.И., Бородина Е.С. Моделирование конвективного теплообменного аппарата с целью повышения его энергоэффективности. Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2024. № 3 (411). С. 218–225.
15. Осинцев К.В., Краснов И.А., Васильев К.Д., Егоров В.И., Крохалева Н.Н. Исследование поля температур теплопередачи в теплообменном аппарате типа "труба в трубе" расчетным и численным методом. Оригинальные исследования. 2022. № 12 (11). С. 12–21.
16. Систер В.Г., Пушнов А.С., Пирогова О.В., Карпенко А.С. Современные методы интенсификации процессов тепло- и массообмена в контактных аппаратах с насадкой. Химическая технология. 2018. № 19 (2). С. 81–87.
17. Каган А.М., Систер В.Г., Пушнов А.С., Пирогова О.В., Карпенко А.С. Гидродинамический метод определения активной поверхности насыпных насадок для осуществления тепло- и массообменных процессов. Химическая технология. 2018. № 19 (4). С. 173–177.
18. Коновалов В.И., Романова Е.В., Колиух А.Н. Исследование процесса теплообмена в оребренном трубчатом рекуператоре. Вестник ТГТУ. 2012. № 18 (4). С. 876–880.
19. Stepykin A.V., Ruzanov S.R., Sidiyagin A.A., Bukharov D.M., Tutanina E.M. Experimental study of the hydraulic resistance of plate modules of a heat and mass transfer device. Chemical and Petroleum Engineering. 2023. Vol 59 (7–8). P. 563–569.
20. Мальцева О. М. Моделирование процесса намораживания льда на цилиндрической поверхности емкостного криоконцентратора. Техника и технология пищевых производств. 2016. № 3(42). С. 118–124.
21. Silin A. M., Lagutkin M. G., Baranova E. Yu. Reduction of energy consumption for pumping heat carriers while ensuring the required amount of transferred heat in plate heat exchanger. Chemical and Petroleum Engineering. 2024. Vol. 59. P. 618–622.
22. Шаповалов А.В., Кидун Н.М., Никулина Т.Н., Чернявская В.В. Анализ исследований максимальных тепловых потоков в термосифонах с циркуляцией промежуточного теплоносителя. Современные проблемы машиноведения: статья в сборнике XIV Международной научно-технической конференции. Гомель: Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого. 2023. С. 92–95.

23. Занина К.О., Лагуткин М.Г., Юрицына А.М., Голованов И.Ю. Анализ вариантов оребрения двухтрубного теплообменного аппарата для повышения эффективности процесса. Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. 2024. № 3 (48). С. 19–25.
24. Stepykin A.V., Goryunov N.S., Malygin L.A., Sidyagin A.A., Bukharov D.M., Tutanina E.M. Influence of the height of surface microroughness on the wettability of polymer-packed devices. Chemical and Petroleum Engineering. 2023. Vol. 59 (1–2) P. 86–92.
25. Vasiliev P.D., Sidyagin A.A., Stepykin A.V., Bukharov D.M., Balakhnin I.A. Influence of the surface structure on the wettability of polymer packing elements in heat- and mass-transfer equipment. Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2022. Vol. 56 (2). P. 212–220.

References:

1. Popov I.A., Mahjanov H.M., Gureev V.M. The physical basis and industrial application of heat transfer intensification. *Intensification of heat exchange*. Kazan': Centr innovacionnyh tehnologij Publ. 2009;560. (In Russ.).
2. Ugolnikova M.A., Chernyavskaya V.V. Dynamics of water ice formation during the operation of vessel cryoconcentrators. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2021; 57 (7–8): 561–566.
3. Sapozhnikov V.B., Ugolnikova M.A., Chernyavskaya V.V. Evaluating the performance of low-temperature liquid separation devices with two-stage refrigeration and pre-cooling. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2023;59 (1–2):134–138.
4. Lagutkin M.G., Baranova E.Yu., Mishachkin D.I., Naumov V.N. Increasing efficiency of shell-and-tube heat exchanger taking account of energy consumption reduction. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2022;57 (9–10):713–719.
5. Filippov V.V. Improving the design of heat exchange plants based on methods of heat exchange intensification. *Trends in the development of science and education*. 2023;100(5):130–132. (In Russ.).
6. Kobzeva A.A., Vu S.K., Glazov V.S. Features of heat transfer in a channel whose walls have different temperatures and heat transfer intensifiers. *Energy saving - theory and practice: article in the collection of scientific papers of the Eleventh All-Russian Conference with International participation*. 2022;173-176. (In Russ.).
7. Burcev S.A., Vinogradov Ju.A., Kiseljov N.A., Strongin M.M. The choice of rational heat transfer intensifiers in heat exchange equipment. *Science and Education: scientific publication of the Bauman Moscow State Technical University*. 2016;12:35–56. (In Russ.).
8. Mehrjardi S.A.A., Khademi A., Said Z., Ushak S., Chamkha A.J. Effect of elliptical dimples on heat transfer performance in a shell and tube heat exchanger. *Heat and Mass Transfer*. 2023;59 (10):1781–1791.
9. Bhattacharyya S., Vishwakarma D.K., Srinivasan A., Soni M.K., Goel V., Sharifpur M., Meyer J., Ahmadi M.H., Issakhov A. Thermal performance enhancement in heat exchangers using active and passive techniques: a detailed review. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2022; 147 (17):9229–9281.
10. Alfellag M.A., Ahmed H.E., Jehad M.G., Farhan A.A. The hydrothermal performance enhancement techniques of corrugated channels: a review. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2022;147(19):10177–10206.
11. Lobanov I.E. Modeling of flow and heat transfer in pipes with turbulators of viscous heat carriers in the laminar region, as well as in the transition to turbulent flow. *Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Sciences*. 2023;50 (3):24–36. (In Russ.).
12. Gil'fanov K.H., Shakirov R.A. Neural network modeling of heat exchange characteristics of near-surface intensification of heat exchange equipment. *Bulletin of Kazan State Technical University named after A.N. Tupolev*. 2020;76 (4): 5-11. (In Russ.).
13. Solov'ev S.V., Chernyshev A.V. Modeling of heat transfer of a liquid in a spherical layer. *South Siberian Scientific Bulletin*. 2019;1 (25):114-122. (In Russ.).
14. Hodjashov E.O., Tjurin M.P., Sedljarov O.I., Borodina E.S. Simulation of a convective heat exchanger in order to increase its energy efficiency. *News of higher educational institutions. Textile industry technology*. 2024; 3 (41): 218-225. (In Russ.).
15. Osincev K.V., Krasnov I.A., Vasil'ev K.D., Egorov V.I., Krohaleva N.N. Investigation of the temperature field of heat transfer in a heat exchanger of the "pipe in a pipe" type by calculation and numerical method. *Original research*. 2022;12 (11):12-21. (In Russ.).
16. Sister V.G., Pushnov A.S., Pirogova O.V., Karpenko A.S. Modern methods of intensification of heat and mass transfer processes in contact devices with a nozzle. *Chemical technology*. 2018;19 (2): 81-87. (In Russ.).
17. Kagan A.M., Sister V.G., Pushnov A.S., Pirogova O.V., Karpenko A.S. Hydrodynamic method for determining the active surface of bulk nozzles for heat and mass transfer processes. *Chemical technology*. 2018;19 (4):173-177. (In Russ.).
18. Konovalov V.I., Romanova E.V., Koliuh A.N. Investigation of the heat transfer process in a finned tubular heat exchanger. *Herald of TGTU*. 2012;18 (4): 876–880. (In Russ.).
19. Stepykin A.V., Ruzanov S.R., Sidyagin A.A., Bukharov D.M., Tutanina E.M. Experimental study of the hydraulic resistance of plate modules of a heat and mass transfer device. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2023; 59 (7–8): 563–569.

20. Mal'ceva O. M. Modeling of the ice freezing process on the cylindrical surface of a capacitive cryoconcentrator. *Equipment and technology of food production*. 2016;3(42):118-124. (In Russ.).
21. Silin A. M., Lagutkin M. G., Baranova E. Yu. Reduction of energy consumption for pumping heat carriers while ensuring the required amount of transferred heat in plate heat exchanger. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2024; 59:618-622.
22. Shapovalov A.V., Kidun N.M., Nikulina T.N., Chernjavskaja V.V. Analysis of studies of maximum heat fluxes in thermosiphons with intermediate coolant circulation. Modern problems of machine science: an article in the collection of the XIV International Scientific and Technical Conference. Gomel: Gomel State Technical University named after P.O. Sukhoi. 2023: 92-95. (In Russ.).
23. Zanina K.O., Lagutkin M.G., Juricyna A.M., Golovanov I.Ju. Analysis of finning options for a two-tube heat exchanger to increase the efficiency of the process. Energy and resource conservation: industry and transport. 2024;3 (48):19-25. (In Russ.).
24. Stepykin A.V., Goryunov N.S., Malygin L.A., Sidyagin A.A., Bukharov D.M., Tutanina E.M. Influence of the height of surface microroughness on the wettability of polymer-packed devices. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2023; 59 (1-2):86-92.
25. Vasiliev P.D., Sidyagin A.A., Stepykin A.V., Bukharov D.M., Balakhnin I.A. Influence of the surface structure on the wettability of polymer packing elements in heat- and mass-transfer equipment. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2022; 56 (2): 212-220.

Сведения об авторах:

Чернявская Варвара Васильевна, ассистент кафедры «Техника низких температур им. П.Л. Капицы», v_ch20@mail.ru; ORCID:0009-0005-5986-0165.

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

Голованов Иван Юрьевич, кандидат технических наук, ассистент кафедры «Аппаратурное оформление и автоматизация технологических производств имени профессора М.Б. Генералова», igol95@yandex.ru; ORCID:0009-0007-9073-1235.

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

Information about authors:

Varvara V. Chernyavskaya, Assistant, Department «Low Temperature Engineering named after P.L. Kapitsa», v_ch20@mail.ru; ORCID:0009-0005-5986-0165.

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

Ivan Yu. Golovanov, Cand. Sci. (Eng.), Assistant, Department «Hardware Design and Automation of Technological productions named after Professor M.B. Generalov», igol95@yandex.ru; ORCID:0009-0007-9073-1235.

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

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 07.11.2024.

Одобрена после рецензирования/Revised 25.12.2024.

Принята в печать/Accepted for publication 15.01.2025.

ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА
ENERGY AND ELECTRICAL ENGINEERING

УДК 621.314.222.6

DOI: 10.21822/2073-6185-2025-52-1-31-38



Обзорная статья / Review article

**Повышение эффективности работы силовых трансформаторов
за счет интенсификации их охлаждения во время работы**

М.В. Шамаров¹, В.И. Алёшин¹, И.А. Калмыков¹, А.М. Шамаров²

¹Кубанский государственный технологический университет,

¹350072, г. Краснодар, ул. Московская, 2, Россия,

²Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова,

²115054, Москва, Стремянный переулок, 36, Россия

Резюме. Целью исследования является разработка рекомендаций по оптимизации систем охлаждения силовых трансформаторов с целью повышения их эффективности и снижения потерь при трансформации электроэнергии. **Метод.** В ходе исследования проводился термодинамический и сравнительный анализ существующих методов охлаждения электротрансформаторов с целью выявления преимуществ и недостатков систем охлаждения. **Результат.** Представлены различные схемы охлаждения и системы утилизации теплоты трансформации. Обосновано, что существуют низкотемпературные системы, способные существенно повысить технические характеристики трансформатора, не прибегая к столь низким температурам. Учитывая особенность работы фреоновых холодильных машин, когда холодильный агент, например, R134a и смазочное масло взаимно растворяются друг в друге, образовывая «двуухслойный пирог», и заполняют всю холодильную систему, можно представить трансформатор элементом холодильной машины (испарителем). **Вывод.** Применение инновационных методов охлаждения может значительно повысить эффективность работы электрических трансформаторов при одновременном увеличении их КПД.

Ключевые слова: оптимизация теплообмена, схема отбора тепла, температура, трансформатор, холодильная машина

Для цитирования: М.В. Шамаров, В.И. Алёшин, И.А. Калмыков, А.М. Шамаров. Повышение эффективности работы силовых трансформаторов за счет интенсификации их охлаждения во время работы. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025; 52(1):31-38. DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-1-31-38

**Improving the efficiency of power transformers
by intensifying their cooling during operation**

M.V. Shamarov¹, V.I. Aleshin¹, I.A. Kalmykov¹, A.M. Shamarov²

¹Kuban State Technological University,

¹2 Moskovskaya St., Krasnodar 350072, Russia,

²G.V. Plekhanov Russian Economic University,

²36 Stremyanny lane, Moscow 115054, Russia

Abstract. Objective. The aim of the study is to develop recommendations for optimizing cooling systems for power transformers in order to increase their efficiency and reduce losses during electric power transformation. **Method.** The study included a thermodynamic and comparative analysis of existing methods of cooling electric transformers in order to identify the advantages and disadvantages of cooling systems. **Result.** Various cooling schemes and transformation heat recovery systems are presented. It is substantiated that there are low-temperature systems that can significantly improve the technical characteristics of a transformer without resorting to such low temperatures. Considering the peculiarity of freon refrigeration machines, when a refrigerating agent, for example, R134a and lubricating oil mutually dissolve in each other,

er, forming a "two-layer cake", and fill the entire refrigeration system, a transformer can be considered an element of a refrigeration machine (evaporator). **Conclusion.** The use of innovative cooling methods can significantly improve the efficiency of electric transformers while simultaneously increasing their efficiency.

Keywords: heat exchange optimization, heat extraction scheme, temperature, transformer, refrigeration machine

For citation: M.V. Shamarov, V.I. Aleshin, I.A. Kalmykov, A.M. Shamarov. Improving the efficiency of power transformers by intensifying their cooling during operation. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2025;52(1):31-38. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-1-31-38

Введение. Без электрической энергии невозможно представить себе жизнь современного общества. Это - энергоснабжение промышленных предприятий и работа бытовых приборов, удобный электрический транспорт и исследования космоса. Человечество научилось получать электроэнергию, используя различные технологические варианты. Это природные силы ветра и энергия волн, использование углеводородного сырья и, наконец, атомная энергетика. Электроэнергию удобно передавать на большие расстояния, изменять параметры электрического тока, и практически невозможно обойтись без её трансформации. При трансформации электроэнергии, т.е. изменении напряжения, силы тока, параметров магнитного поля всегда существуют потери, достигающие больших значений. Они, в основном, связаны с увеличением температурных показателей работы трансформаторов, что может вызвать их перегрев и создание аварийных ситуаций. Поэтому электрические трансформаторы необходимо охлаждать. Учитывая гигантское количество использования электроэнергии, не трудно понять, что даже небольшие улучшения в работе трансформаторов, в частности, системе их охлаждения, может привести к значительному экономическому эффекту [1, 3].

Постановка задачи. Целью исследования является анализ существующих методов охлаждения электротрансформаторов, выявление преимуществ и недостатков систем охлаждения, а также разработка рекомендаций по оптимизации систем охлаждения с целью повышения их эффективности и снижения потерь при трансформации электроэнергии.

Методы исследования. При проведении исследования были рассмотрены различные системы охлаждения трансформаторов, включая традиционную систему охлаждения с использованием трансформаторного масла, оптимизацию теплообмена с помощью различных устройств и конструктивных решений, а также инновационных решений, такие как охлаждение с использованием криогенных устройств.

Для сравнительного анализа использовались такие критерии, как энергоэффективность, стоимость внедрения и эксплуатации. Методы исследования включали в себя анализ научной литературы о работе различных систем охлаждения трансформаторов в реальных условиях эксплуатации, аналитические методы исследования режимов работы трансформатора с различными системами охлаждения [1- 7].

Обсуждение результатов. Исследование показало, что применение инновационных методов охлаждения может значительно повысить эффективность работы электрических трансформаторов при одновременном увеличении их КПД, поскольку появляется возможность увеличения полезной нагрузки на трансформатор. В частности, использование систем охлаждения с применением парокомпрессионной холодильной машины с использованием в качестве испарителя корпуса трансформатора и проведенный обзор показал на патентную чистоту предлагаемого способа охлаждения [3, 12, 14, 20, 21]

При производстве и передачи электроэнергии конечному потребителю в настоящее время используются следующие компоненты электрической сети (рис. 1):

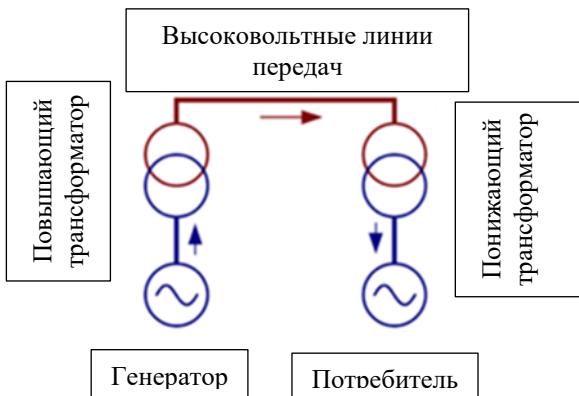


Рис. 1 - Принципиальная схема производства, передачи и потребления электроэнергии
Fig. 1 - Schematic diagram of production, transmission and consumption of electric power

Тепловые электростанции – производят электричество путем превращения тепловой энергии от сгорания органического топлива сначала в механическую энергию, а затем в электрическую. Является самым распространенным способом, однако есть опасения исчерпания невозобновляемых природных ресурсов, а также экологическое загрязнение атмосферы диоксидом углерода окисью углерода, окислами серы, углеводородами, огромными количествами твёрдых частиц (золы) и другими вредными веществами.

Тепловые электростанции – производят электричество путем превращения тепловой энергии от сгорания органического топлива сначала в механическую энергию, а затем в электрическую. Является самым распространенным способом, однако есть опасения исчерпания невозобновляемых природных ресурсов, а также экологическое загрязнение атмосферы диоксидом углерода окисью углерода, окислами серы, углеводородами, огромными количествами твёрдых частиц (золы) и другими вредными веществами.

Гидроэлектростанции - производят электричество, используя механическую энергию потока (напора) воды, которая затем с помощью гидроагрегата преобразуется в электроэнергию. Данный способ для производства электрической энергии использует возобновляемые природные ресурсы, поэтому стоимость электроэнергии становится значительно ниже, чем при использовании других видов электростанций. Главным недостатком является зависимость от большого количества воды (близость реки, водопада и т.п.).

Атомные электростанции, на которых энергия атомного распада преобразуется в электрическую. Данный способ обладает большей мощностью и экологически чище предыдущих. Однако при аварии последствия будут катастрофическими [1, 2, 5, 10, 11].

Указанные способы являются традиционными, но на данный момент набирают популярность альтернативные источники, среди них: ветроэнергетика – использует энергию ветра для производства энергии; солнечная энергетика – преобразует солнечный свет в электроэнергию; геотермальная энергетика – использует термальные подземные воды и горячие источники; водородная энергетика – в качестве топлива используется водород; волновая и приливная энергетика – в данном способе применяется естественная кинетическая энергия ветровых волн и морских приливов [1, 3, 4, 7].

На тепловых электрических станциях питающий газ поступает по газопроводу в паровой котел. В котле газ сгорает и нагревает воду, проходящую по специальным трубкам котла. При нагревании вода превращается в перегретый пар, который затем поступает в паровую турбину. Пар поступает внутрь на лопатки турбины и начинает вращать ротор генератора, создавая в обмотках статора переменный электрический ток.

Таким образом, тепловая энергия пара превращается в механическую энергию, а затем в генераторе в электрическую. Через повышающий трансформатор и понижающую трансформаторную подстанцию электроэнергия по линиям электропередач поступает потребителям. Отработавший в турбине пар направляется в конденсатор, где превращается

в воду и возвращается в котел. Используется обратная система водоснабжения, для охлаждения воды на ТЭЦ используются вентиляторные и башенные градирни [2, 11, 13].

Полученная электрическая энергия поступает на распределительное устройство – электроустановку, предназначенную для приема и распределения электрической энергии, содержащая электрические аппараты, шины и вспомогательные устройства и далее подается на линию электропередачи (ЛЭП), которая является одним из компонентов электрической сети, предназначенная для передачи или распределения электроэнергии по проводам на расстояние. При передаче энергии на дальние расстояния имеются потери электроэнергии, которые зависят от силы тока, для уменьшения потерь снижают силу тока многократно повышая напряжение в сети с помощью трансформатора.

В конструкцию трансформаторов входят следующие основные составные части. Корпус трансформатора представляет собой металлическую сварную конструкцию прямоугольной формы, состоящую из бака и крышки. Наружная поверхность корпуса трансформатора окрашена порошковой краской светлого цвета. Соединение крышки и бака в разъеме – болтовое. Уплотнение разъема – прокладка из маслобензостойкой резины.

Бак распределительного трансформатора состоит из верхней рамы, гофрированных стенок и дна. На боковой стенке дна бака предусмотрен вентиль для слива масла и два контакта заземления. В баке устанавливается активная часть трансформатора, включающая обмотки низкого и высокого напряжения, изоляции, отводов, переключающее устройство и др. Для увеличения отвода теплоты от разогретого трансформаторного масла можно использовать замену воздушного обдува, например, водяным охлаждением, т.к. теплоемкость воды более чем в 4 раза выше теплоемкости воздуха. Такие системы охлаждения известны и используются для трансформаторов мощностью 160 МВА и выше. Чем мощнее установка, тем быстрее должна работать система охлаждения [3, 17, 19, 20].

В настоящее время разрабатываются новые конструкции трансформаторов с обмотками, охлаждаемыми до очень низких температур. Трансформаторы, использующие принцип сверхпроводимости (криогенные трансформаторы), будут иметь небольшую транспортную массу при мощности 1000 МВт и выше [4, 21].

Трансформатор силовой масляной типа ТМН-СЭЩ с регулированием напряжения под нагрузкой (РПН) общего назначения мощностью от 1000 до 6300 кВА напряжением до 35 кВ включительно имеет трехфазные двухобмоточные катушки, предназначенные для передачи и распределения электроэнергии переменного тока в электросетях, является наиболее распространенным типом. Основная часть остова – магнитопровод. Обмотки выполняются из алюминиевого провода прямоугольного сечения и межслоевой изоляции из кабельной бумаги [5, 12, 16, 18].

На промышленных предприятиях наиболее распространены силовые трансформаторы с масляным охлаждением, когда магнитопровод с обмотками погружен в масляную ванну. Тепло, выделяющееся в обмотках и магнитных линиях трансформатора, воспринимается маслом, а затем передается окружающему воздуху через корпусные поверхности и радиаторы. При этом организуется естественная циркуляция масла внутри трансформатора. Количество теплоты, воспринимаемое маслом и передающееся в атмосферу, зависит от ряда причин. В общем случае, в процессе трансформирования электрической энергии часть энергии теряется в трансформаторе на покрытие потерь. Потери в трансформаторе разделяются на электрические и магнитные и могут быть рассчитаны [6, 11, 13, 14].

В трансформаторах с естественным охлаждением масла при номинальной нагрузке устройства средняя температура масла в верхних слоях достигает 80°C, в нижних слоях составляет 30 - 35°C, в средней части – 65 -70°C [7]. Понижая температуру обмоток можно увеличить полезную мощность трансформации, увеличить КПД устройства.

Интенсифицировать теплообмен, т.е. увеличить коэффициент теплоотдачи α_b со стороны охлаждающего воздуха, можно оребрением наружной теплообменной поверхности или установкой вентиляторов обдува (рис. 2).

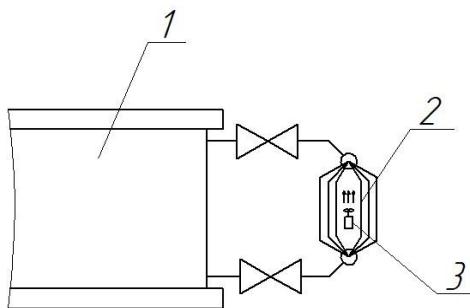


Рис. 2 - Схема системы охлаждения с дутьем и естественной циркуляцией масла

1 - бак трансформатора; 2 - радиаторы охладителя; 3 - вентилятор обдува

Fig. 2 - Scheme of cooling system with blowing and natural oil circulation

1 - transformer tank; 2 - cooler radiators; 3 - blower fan

В трансформаторах с воздушным дутьем, радиаторы продуваются воздухом от нескольких электрических вентиляторов, расположенных внутри каждого радиатора в пространстве между их трубами.

Интенсифицировать теплообмен со стороны охлаждаемого масла, т.е. увеличить коэффициент теплоотдачи α_m , можно установив в теплообменных трубках специальные турбулизаторы или увеличить скорость движения масла в трубках охладителя (рис. 3).

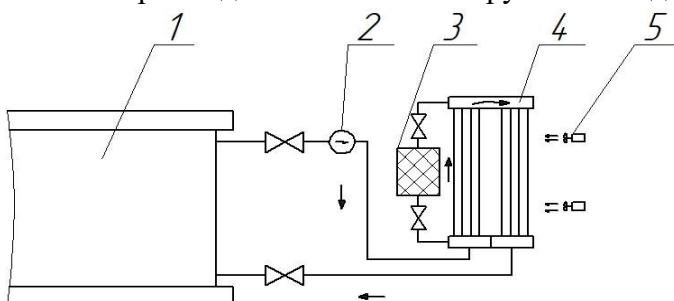


Рис. 3 - Схема системы охлаждения с дутьем и принудительной циркуляцией масла:

1 - бак трансформатора; 2 - масляный насос; 3 - адсорбционный фильтр;

4 - охладитель; 5 - вентилятор обдува

Fig. 3 - Schematic diagram of a cooling system with forced oil circulation and blowing:

1 - transformer tank; 2 - oil pump; 3 - adsorption filter; 4 - cooler; 5 - blower fan

Разработаны различные схемы охлаждения и системы утилизации теплоты трансформации. В зависимости от типа, количества и мощности, установленных трансформаторов, их нагрузки, требуемой тепловой производительности, вида используемого теплоносителя в системе отопления (трансформаторное масло, вода, воздух) и удалённости потребителей могут применяться различные схемы отбора тепла: с непосредственной подачей нагретого масла в систему отопления; с нагревом воды в масловодяном теплообменнике; с нагревом воды посредством теплового насоса; с нагревом воздуха в масловоздушном теплообменнике; с непосредственным отводом нагретого воздуха от охлаждающих радиаторов; с нагревом воздуха в водовоздушном теплообменнике.

Схемы отбора тепла для системы воздушного отопления основаны на использовании теплоты вентиляционных выбросов системы охлаждения трансформаторов и являются перспективными для подстанций без обслуживающего персонала, а также закрытых подстанций. Они сочетают в себе простоту конструкции и надежность, не требуют регулировки и какого-либо надзора [8, 9, 15, 16, 19].

Для интенсивного охлаждения трансформатора уже используется холодильные машины и даже криогенная техника (жидкий азот, минус 196°C), однако применение криогенных температур ограничено (только для мощных трансформаторов, повышенные требования к надежности криогенной системы, высокая стоимость проекта).

Привлекательной является ниже приведенная схема охлаждения (рис. 4). Известно, что при работе фреоновых холодильных машин масло из компрессора уносится в холодильную систему, т.к. фреон и масло взаиморастворимы и в системе циркулирует смесь этих веществ. Т.к. взаиморастворимость неизбежна, то можно рассматривать электрический масляный трансформатор как испаритель холодильной машины, а объектом охлаждения электрические обмотки [9].

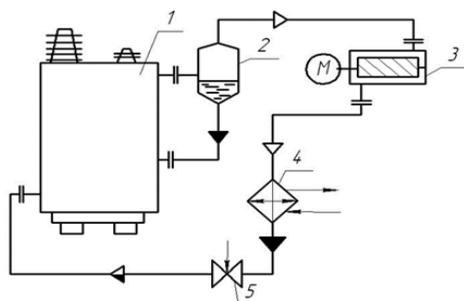


Рис. 4 - Принципиальная схема охлаждения трансформатора холодильной машиной:
1- бак трансформатора (испаритель), 2 – отделитель масла, 3 – винтовой компрессор,
4 – конденсатор, 5 – дроссельное устройство

Fig. 4 - Schematic diagram of transformer cooling by a refrigeration machine: 1 - transformer tank (evaporator), 2 - oil separator, 3 - screw compressor, 4 - condenser, 5 - throttle device

При прохождении фреона через бак трансформатора, жидкый фреон, воспринимая теплоту от охлаждаемого масла (обмоток трансформатора), кипит, изменяя своё агрегатное состояние, и совершает холодильный эффект. Пары фреона с капельным маслом покидая бак, отделяются от масла в отделителе масла и всасываются компрессором.

После сжатия в компрессоре пары холодильного агента охлаждаются и конденсируются в конденсаторе, передавая теплоту в окружающую среду (возможна утилизация). Проходя дроссельное устройство, жидкий холодильный агент дросселируется, резко снижая свою температуру, и вновь поступает в бак трансформатора (испаритель) для совершения холодильного эффекта. При использовании винтового или спирального компрессора использование отделителя жидкости не обязательно. Мощность холодильной машины определяется потерями при трансформации энергии и граничными температурными условиями работы холодильной машины.

Вывод. Таким образом, отвод тепла, обусловленного потерями в силовых трансформаторах, является одним из возможных путей экономии капитальных затрат за счет снижения количества трансформаторов в связи с увеличением их мощностных характеристик. Для решения вопроса о технико-экономической целесообразности снижения потерь и возможных размерах такого снижения необходимо принимать во внимание ряд факторов, а также конкретные условия производства и передачи электроэнергии, сложившиеся в каждом конкретном регионе.

Библиографический список:

1. Демидова Г.Л., Лукичев Д.В. Введение в специальность Электроэнергетика и электротехника – СПб: Университет ИТМО, 2016 – 108 с.
2. Тепловые электрические станции: учебник для вузов. / Т 343 В.Д. Буров, Е.В. Дорохов, Д.П. Елизаров и др.; под ред. В.М. Лавыгина, А.С. Седлова, СВ. Цанева. - 3-е изд., стереот. - М.: Издательский дом МЭИ, 2009. - 466 с: ил.
3. Голунов А.М. Охлаждающие устройства масляных трансформаторов М. –Л.: Энергия, 1964. – 152 с.
4. Боднар В.В. Нагрузочная способность силовых масляных трансформаторов. М.: Энергоатомиздат, 1983.-176с., (Трансформаторы; Вып.40). Под ред. Г. Е. Тарле.
5. Быстрицкий, Г. Ф. Электроснабжение. Силовые трансформаторы : учебное пособие для среднего профессионального образования / Г.Ф. Быстрицкий, Б.И. Кудрин. - 2-е изд., испр. и доп. — Москва: Издательство Юрайт, 2024. - 201 с.

6. Воротницкий В. Э., Люблин А. С. Использование потерь силовых трансформаторов. – М.: ЭНАС, 1995. – 172 с.
7. Швед П. и др. Утилизация тепловых потерь силовых трансформаторов с помощью тепловых насосов// Техническая электродинамика, 1993. № 5. С 47-49.
8. Гиршин С.С. и др. Влияние температуры обмоток на нагружочные потери активной мощности в силовых трансформаторах подстанций //Омский научный вестник, №2, 2013г.
9. Устройство для охлаждения силового трансформатора/В.И. Алёшин, М.В. Шамаров, И.А. Калмыков, А.М. Шамаров. – Патент РФ на изобретение № 2820081. Заявл.13.10.2023, № 2023126247. Опубл. 28.05.2024.
10. Калачев О.В., Юдин Л.Ю. "Вентиляция и охлаждение силовых трансформаторов с соблюдением правил промышленной безопасности в помещениях объектов электроэнергетики"/ Журнал «Промышленные и строительные технологии», Выпуск №6 (8), март 2016.
11. Шек О.А., Беляевский Р.В., Способы охлаждения силовых трансформаторов. Электроцех. 2019, №5.
12. Способ испарительного охлаждения компрессора холодильной установки Шляховецкий В.М., Черных А.И., Шляховецкий Д.В., Шамаров М.В. Патент на изобретение RU 2117222 С1, 10.08.1998. Заявка № 96114535/06 от 16.07.1996.
13. Баширов М.Г. Повышение эффективности охлаждения силовых масляных трансформаторов/ Баширов М.Г., Минлибаев М.Р., Хисматуллин А.С./Нефтегазовое дело: электронный научный журнал. 2014. №2.
14. Крышка блока цилиндров многорядного компрессора Шляховецкий В.М., Шамаров М.В. Патент на изобретение RU 2139447 С1, 10.10.1999. Заявка № 97105117/06 от 02.04.1997.
15. Шефер Д.Н., Киреев Д.Б., Беспрозванных А.С., Колмаков В.О. Модернизация тяговых подстанций с применением трансформаторов с форсированным охлаждением//Научный сетевой журнал «Столыпинский вестник», №9/2022.
16. Шамаров М.В. Анализ массогабаритных показателей поршневого компрессора для передвижной компрессорной станции / М.В. Шамаров, М.Ю. Мелёхина // В сборнике: Современные технологии машиностроительного производства, инновационные направления развития компрессорной техники и газоразделительных систем. сборник докладов Международной научно-практической конференции, посвященной 60-летию ОАО «Компрессорный завод «БОРЕЦ». ФГБОУ ВПО «КубГТУ», ОАО «Компрессорный завод «БОРЕЦ», ООО «Издательский Дом - Юг». 2013. С. 50-53.
17. Шамаров М.В. Мембранные абсорбционные холодильные установки // В книге: Инновационные направления интеграции науки, образования и производства. Сборник тезисов докладов участников I Международной научно-практической конференции. Под общей редакцией Е.П. Масюткина. 2020. С. 209-211.
18. Шамаров М.В. Особенности математической модели холодильного поршневого компрессора с внешним кипящим охлаждением/ М.В. Шамаров, Ю.С. Беззаботов // В сборнике: Механика, оборудование, материалы и технологии. Электронный сборник научных статей по материалам третьей международной научно-практической конференции. 2020. С. 976-980.
19. Шамаров М.В. Использование прикладного моделирования при проектировании каскадной холодильной установки/М.В. Шамаров, А.М. Шамаров//В сборнике: Материалы пула научно-практических конференций. Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского; Керченский государственный морской технологический университет; Луганский государственный педагогический университет; Луганский государственный университет имени Владимира Даля. Керчь, 2023. С. 214-218.
20. ГОСТ 11677–85 Трансформаторы силовые. Общие технические условия.
21. ГОСТ 14209–85 Трансформаторы силовые масляные общего назначения. Допустимые нагрузки.

References:

1. Demidova G.L., Lukichev D.V. Introduction to the Specialty Electric Power Engineering and Electrical Engineering – SPb: ITMO University, 2016;108. (In Russ.)
2. Thermal Power Plants: Textbook for Universities. T 343 V.D. Burov, E.V. Dorokhov, D.P. Elizarov et al.; edited by V.M. Lavigin, A.S. Sedlov, S.V. Tsanev. - 3rd ed., stereot. - M.: MPEI Publishing House, 2009;466. (In Russ.)
3. Golunov A.M. Cooling Devices of Oil Transformers M.-L.: Energy, 1964;152 (In Russ.)
4. Bodnar V.V. Load capacity of power oil transformers. Moscow: Energoatomizdat, 1983;176, (Transformers; Issue 40). Ed. by G. E. Tarle. (In Russ.)
5. Bystritsky, G.F. Power supply. Power transformers: a textbook for secondary vocational education / G.F. Bystritsky, B.I. Kudrin. - 2nd ed., corrected. and additional - Moscow: Yurait Publishing House, 2024: 201 (In Russ.)
6. Vorotnitsky V.E., Lyublin A.S. Use of power transformer losses. - Moscow: ENAS, 1995:172. (In Russ.)

7. Shved P. et al. Utilization of heat losses of power transformers using heat pumps. *Technical Electrodynamics*, 1993;5: 47-49. (In Russ.)
8. Girshin S.S. et al. Effect of winding temperature on load losses of active power in power transformers of substations. *Omsk Scientific Bulletin*, 2013; 2. (In Russ.)
9. Device for cooling a power transformer / V.I. Aleshin, M.V. Shamarov, I.A. Kalmykov, A.M. Shamarov. - Russian Federation Patent for Invention No. 2820081. Claimed. 13.10.2023, No. 2023126247. Published. 28.05.2024. (In Russ.)
10. Kalachev O.V., Yudin L.Yu. "Ventilation and cooling of power transformers in compliance with industrial safety regulations in the premises of electric power facilities" Industrial and Construction Technologies MagazineMarch 2016; 6(8). (In Russ.)
11. Shek O.A., Belyaevsky R.V., Methods of cooling power transformers. Electrical workshop. 2019;5. (In Russ.)
12. Method of evaporative cooling of a refrigeration unit compressor Shlyakhovetsky V.M., Chernykh A.I., Shlyakhovetsky D.V., Shamarov M.V. Patent for invention RU 2117222 C1, 10.08.1998. Application No. 96114535/06 dated 16.07.1996. (In Russ.)
13. Bashirov M.G. Increasing the cooling efficiency of power oil transformers. Bashirov M.G., Minlibaev M.R., Khismatullin A.S. *Oil and gas business: electronic scientific journal*. 2014; 2. (In Russ.)
14. Cylinder block cover of a multi-row compressor Shlyakhovetsky V.M., Shamarov M.V. Patent for invention RU 2139447 C1, 10.10.1999. Application No. 97105117/06 dated 04/02/1997. (In Russ.)
15. Modernization of traction substations using transformers with forced cooling. Shefer D.N., Kireev D.B., Besprozvannykh A.S., Kolmakov V.O. Scientific online journal *Stolypin Bulletin* 2022;9. (In Russ.)
16. Shamarov M.V. Analysis of weight and size indicators of a piston compressor for a mobile compressor station. M.V. Shamarov, M.Yu. Melekhina // In the collection: Modern technologies of mechanical engineering production, innovative directions in the development of compressor equipment and gas separation systems. collection of reports of the International scientific and practical conference dedicated to the 60th anniversary of JSC Compressor Plant BORETS. FGBOU HPE KubSTU, JSC Compressor Plant BORETS, LLC Publishing House - Yug. 2013: 50-53. (In Russ.)
17. Shamarov M.V. Membrane absorption refrigeration unit. In the book: Innovative directions of integration of science, education and production. Collection of abstracts of reports of participants of the I International scientific and practical conference. General editor E.P. Masyutkin. 2020:209-211. (In Russ.)
18. Shamarov M.V. Features of the mathematical model of a refrigeration piston compressor with external boiling cooling. M.V. Shamarov, Yu.S. Bezbezbabov. Mechanics, equipment, materials and technologies. Electronic collection of scientific articles based on the materials of the third international scientific and practical conference. 2020: 976-980. (In Russ.)
19. Shamarov M.V. Use of applied modeling in the design of a cascade refrigeration unit. M.V. Shamarov, A.M. Shamarov. Proceedings of the pool of scientific and practical conferences. Donetsk National University of Economics and Trade named after Mikhail Tugan-Baranovsky; Kerch State Marine Technological University; Lugansk State Pedagogical University; Lugansk State University named after Vladimir Dal. Lugansk State University. Kerch. 2023: 214-218. (In Russ.)
20. GOST 11677-85 Power transformers. General specifications. (In Russ.)
21. GOST 14209-85 General-purpose oil power transformers. Permissible loads.(In Russ.)

Сведения об авторах:

Шамаров Максим Владимирович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологического оборудования и систем жизнеобеспечения; schmax@mail.ru; ORCID 0000-0001-7520-8621

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

Калмыков Илья Алексеевич, студент 3 курса очной формы обучения; schmax@mail.ru

Шамаров Артем Максимович, студент 3 курса очной формы обучения; schmax@mail.ru

Information about authors:

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

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

Ilya A. Kalmykov, 3rd year full-time student; schmax@mail.ru

Artem M. Shamarov, 3rd year full-time student; schmax@mail.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 08.10.2024.

Одобрена после рецензирования/ Revised 20.12.2024.

Принята в печать/Accepted for publication 15.01.2025.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 004.89

DOI: 10.21822/2073-6185-2025-52-1-39-48

Оригинальная статья/ Original article



Обеспечение информационной безопасности в производственной сети

промышленного предприятия

А.Р. Айдинян, Д.Г. Кирсанов

Донской государственный технический университет,
344003, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1, Россия

Резюме. Цель. Цель исследования состоит в разработке подходов для повышения информационной безопасности в производственной сети управления технологическим процессом промышленного предприятия до необходимого уровня. Привычные, и некогда эффективные методы защиты, основанные на физической изоляции, устарели и требуются новые подходы, учитывающие особенности автоматизированных систем управления технологическим процессом. **Метод.** Используемые в ходе исследования методы анализа выявляют различия между автоматизированными системами управления технологическим процессом и классическими информационными системами, основываясь на стандарте NIST SP 800-82, и оценивают их уникальные требования и уязвимости. Применены методы повышения информационной безопасности, включая регулярные тренинги, аудит, сегментацию сети и использование специализированных систем защиты. **Результат.** Разработан алгоритм действий для защиты системы АСУ ТП, обеспечивающий предприятиям соответствие требованиям регуляторов и минимизацию рисков кибератак, а также защиту критически важных производственных процессов. Предложен комплекс профилактических мер и методов устранения уязвимостей в системах АСУ ТП для защиты промышленных сетей. **Вывод.** Обеспечение информационной безопасности в АСУ ТП требует всестороннего подхода, включающего стратегии управления рисками, технические средства и постоянное повышение квалификации персонала. Внедрение предложенных мер и стратегий повысит общую устойчивость промышленных систем к современным угрозам информационной безопасности.

Ключевые слова: информационная безопасность, угроза информационной безопасности, промышленная безопасность, безопасность АСУ ТП

Для цитирования: А.Р. Айдинян, Д.Г. Кирсанов. Обеспечение информационной безопасности в производственной сети промышленного предприятия. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025; 52(1):39-48. DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-1-39-48

Ensuring information security in the production network of an industrial enterprise

A.R. Aydynan, D.G. Kirsanov

Don State Technical University,
1 Gagarin Square, Rostov-on-Don 344003, Russia

Abstract. Objective. The purpose of this article is to explore issues and develop approaches to enhance information security in the production control networks of industrial enterprises to the necessary level. Traditional and once-effective protective methods based on physical isolation have become outdated, necessitating new approaches that consider the characteristics of automated process control systems. **Method.** The analysis presented in the article identifies differences between automated process control systems and classical information systems, based on the NIST SP 800-82 standard, and evaluates their unique requirements and vulnerabilities. Methods for improving information security are proposed, including regular training, audits, network segmentation, and the use of specialized protection systems. **Result.** An action algo-

rithm has been developed to protect the APCS system, ensuring that enterprises comply with regulatory requirements and minimize the risks of cyber attacks, as well as protect critical production processes. A set of preventive measures and methods for eliminating vulnerabilities in APCS systems to protect industrial networks is proposed. **Conclusion.** Ensuring information security in APCS requires a comprehensive approach, including risk management strategies, technical means and continuous personnel training. The implementation of the proposed measures and strategies will increase the overall resilience of industrial systems to modern information security threats.

Keywords: training program, competencies, distance learning, requirements, information security, specialty, protection measures, risks, residual risks

For citation: A.R. Aydynan, D.G. Kirsanov. Ensuring information security in the production network of an industrial enterprise. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2025;52(1):39-48. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-1-39-48

Введение. В современных организациях используется широкий спектр ИТ-систем, поэтому обеспечение требуемого уровня информационной безопасности становится особенно важным. Промышленные предприятия стали все более цифровизированными и широко внедряют передовые технологии, такие как Интернет вещей (IoT), машинное обучение и искусственный интеллект. Благодаряенным нововведениям, компании сумели оптимизировать свои производственные процессы и значительно повысить эффективность управления цепочками поставок. Тем не менее, ценой этих преимуществ является более высокая уязвимость к кибератакам. Ранее автоматизированные системы управления технологическим процессом (АСУ ТП) были хорошо защищены благодаря физической изоляции от внешних сетей, использованию в качестве управляющих воздействий аналоговых сигналов и отчасти релейного управления, что обеспечивало высокую степень безопасности. Тем не менее, в современных условиях такой подход уже утратил свою эффективность. Многие предприятия перешли к цифровому формату устройств на всех уровнях системы АСУ, что сделало традиционную модель безопасности, основанную на физической изоляции, устаревшей. Поскольку компании все больше связывают ИТ системы с внешними сетями и облачными сервисами, это приводит к значительному расширению сетевого периметра. Это открывает новые возможности для атак со стороны потенциальных злоумышленников. Для того чтобы обеспечить безопасность в этой новой цифровой среде, необходимо пересмотреть подход к защите промышленных сетей и разработать стратегии, которые учитывали бы актуальные угрозы информационной безопасности.

Постановка задачи. Целью данной статьи является исследование вопросов обеспечения информационной безопасности в АСУ ТП в условиях современной цифровизации промышленных предприятий. В статье рассматриваются ключевые отличия АСУ ТП от обычных информационных систем, анализируются специфические угрозы и уязвимости, а также предлагаются методы и стратегии по защите данных в этих системах. Особое внимание уделяется сравнительному анализу ИТ-систем и АСУ ТП согласно стандарту NIST SP 800-82, а также профилактическим мерам и законодательным аспектам обеспечения безопасности.

Методы исследования. С ростом цифровизации промышленных предприятий и использованием передовых технологий, таких как машинное обучение, интернет вещей (IoT) и искусственный интеллект, произошла революция в сфере автоматизации и управления производством. Эти инновации позволили компаниям оптимизировать производственные процессы, сделать управление цепочками поставок более эффективным и повысить эффективность обслуживания клиентов. Но так же, вместе с этими преимуществами приходит и увеличенная уязвимость к кибератакам.

Ранее, АСУ ТП обладали высокой степенью защиты благодаря своей физической изоляции от внешних сетей. Однако, в современном мире такой подход уже не является

достаточно эффективным. Переход многих предприятий к цифровому формату привел к тому, что традиционная модель безопасности, основанная на физической изоляции, оказалась устаревшей. Вместе с тем, как компании становятся все более связанными с внешними сетями и облачными сервисами, сетевой периметр значительно расширяется, предоставляя потенциальным злоумышленникам больше возможностей для атак.

Таким образом, хотя цифровые технологии приносят значительные выгоды для промышленных предприятий, необходимо признать, что они также увеличивают уровень угрозы кибератак. Для обеспечения безопасности в этом новом цифровом ландшафте требуется пересмотреть подход к защите промышленных сетей и разработать стратегии, учитывающие современные вызовы и угрозы информационной безопасности.

Отличие АСУ ТП от классических информационных систем заключается в их специфике и функциональности, а также в особенностях их архитектуры и взаимодействия с другими устройствами в промышленной среде.

Для информационной связи всех подсистем АСУ ТП используются промышленные протоколы (Modbus, Profinet, EtherCAT) которые в большинстве случаев не выделены в отдельный сегмент сети предприятия. Это отличает их от информационных систем, где используются общие сети связи, такие как Интернет или локальные сети офисного типа. Промышленные сети специально разработаны для обеспечения надежной и безопасной передачи данных в условиях промышленного производства.

Кроме того, в промышленной автоматизации сетевые интерфейсы могут быть неотъемлемой частью соединяемых устройств (ПЛК, исполнительные механизмы, датчики), что делает физическое отделение сетевой части от устройств практически невозможным. Это отличается от других информационных систем, где сетевые интерфейсы чаще всего являются отдельными компонентами и могут быть легко отделены от основных устройств.

Так же, сетевое программное обеспечение прикладного уровня модели OSI используется на основном процессоре ПЛК, что дополнительно подчеркивает уязвимость специфики АСУ ТП. Это означает, что управление и контроль сети интегрированы непосредственно в устройства, работающие в составе системы управления технологическим процессом.

Таким образом, отличие АСУ ТП от классических информационных систем заключается не только в их специализированных функциях и задачах, но и в особенностях их архитектуры, взаимодействия с другими устройствами и принципах построения сетей связи. Сравнительный анализ информационных систем и АСУ ТП из стандарта NIST SP 800-82 необходим для выявления особенностей и различий в обеспечении информационной безопасности между обычными информационными системами и системами управления технологическим процессом.

Такой анализ позволяет определить уникальные угрозы и уязвимости, а также разработать соответствующие стратегии и меры по защите информации в контексте промышленной автоматизации.

Исходя из анализа представленных характеристик информационных систем и АСУ ТП в табл. 1, можно сделать вывод о значительных различиях между ними.

Важно отметить, что данные различия делают системы менеджмента информационной безопасности (ИБ) неподходящими для систем управления технологическими процессами (АСУ ТП). Одним из ключевых отличий является характер требований к функционированию.

В то время как IT-системы, как правило, не являются системами реального времени и имеют различные приоритеты в экстренных ситуациях, АСУ ТП должны выполнять критически важные функции в режиме реального времени, где даже небольшая задержка или потеря данных могут быть недопустимыми.

Таблица 1. Сравнительный анализ информационных систем и АСУ ТП из стандарта NIST SP800-82
Table 1. Comparative analysis of information systems and automated process control systems from the NIST SP800-82 standard

Сравниваемые характеристики Comparable characteristics	ИТ система IT system	АСУ ТП Automated process control system
Требования к функционированию Requirements for operation	Не является системой реального времени. Время реакции не всегда критично. Требуется высокая пропускная способность. Задержка и потеря данных могут быть приемлемыми. Менее критичные функции в аварийных ситуациях. Управление доступом определяется требованиями к ИБ.	Является системой реального времени. Время реакции критично. Не требуется высокая пропускная способность. Задержка и потеря данных не приемлемы. Критична реакция в аварийных ситуациях. Управление доступом должно осуществляться, но не препятствовать функциям управления посредством человека-машинного интерфейса.
Требования к надежности и готовности. Requirements for reliability and availability	Перезагрузка является приемлемой. Дефициты готовности иногда могут быть приемлемыми, в зависимости от эксплуатационных требований.	Перезагрузка может быть неприемлема из-за требований к готовности. Требования к готовности, как правило, требуют внедрения резервирования. Планово-предупредительные работы планируются заранее. Высокая готовность требует всестороннего предварительного тестирования.
Требования к управлению рисками Risk Management Requirements	Управления рисками относится, в первую очередь, к управлению данными. Первостепенное значение имеет конфиденциальность и целостность данных. Отказоустойчивость менее важна, поскольку кратковременный простой не является основным риском. Основным риском является задержка бизнес-операций.	Управление рисками относится, в первую очередь, к управлению физическими процессами. Первостепенное значение имеет безопасность людей, вытекающая из безопасности физических процессов. Отказоустойчивость имеет важное значение, даже кратковременный простой может быть неприемлемым. Основным риском являются несоответствия регулирующим требованиям, воздействие на окружающую среду, жизнь и здоровье людей, оборудование и производство.
Операционные системы Operating systems	Используются различные типы коммерчески доступных операционных систем. Обновления для операционных систем могут устанавливаться автоматически.	Наряду с широко распространенными операционными системами, используются специализированные операционные системы, в том числе, без встроенных функций ИБ. Изменения ПО тщательно контролируются и выполняются, как правило, поставщиками ПО, из-за специализированных алгоритмов управления и влияния на конфигурацию аппаратных средств, а так же из-за значительных затрат на лицензирование изменений.
Ограничения системных ресурсов System resource limitations	Системы имеют достаточно вычислительных ресурсов для добавления дополнительных приложений, связанных с обеспечением ИБ.	Системы разработаны для поддержки промышленных процессов и могут не иметь достаточно памяти или вычислительных ресурсов для поддержки функций безопасности.
Коммуникации Communications	Применяются стандартные коммуникационные протоколы. Применяются в основном уже существующие сети. Применяются типовые сетевые решения.	Применяются специально разработанные (проприetary) коммуникационные протоколы. Часто прокладываются специальные сети. Сети базируются на различных типах медиа и могут требовать экспертизы инженерных знаний.
Управления изменениями Change Management	Изменения ПО выполняются периодически под управлением процедур безопасности. Процедуры изменений ПО зачастую автоматизируются.	Изменения ПО должны быть протестированы, и должно быть подтверждено сохранение целостности системы после внесения изменений. Остановки в работе системы должны быть спланированы заранее. АСУ ТП может использовать не поддерживаемое более ПО.
Поддержка эксплуатации Support operating	Может быть реализована различными поставщиками.	Как правило, реализуется единственным поставщиком.
Продолжительность эксплуатации Duration of operation	Типовая продолжительность жизненного цикла: 3-5 лет	Типовая продолжительность жизненного цикла: 10-15 лет, а для некоторых. Объектов может доходить до 30 лет.
Физическое расположение компонентов. Physical arrangement of components.	Компоненты обычно локализованы и к ним можно получить физический доступ.	Компоненты могут быть изолированными, удаленными и с физически сложным доступом.

Также следует обратить внимание на различия в требованиях к надежности и доступности. В ИТ системах перезагрузка может быть приемлемой, тогда как в АСУ ТП такие ситуации могут быть недопустимыми из-за критической важности времени реакции и требований к непрерывной работе. Другим важным аспектом является управление рисками. Для ИТ-систем первостепенное значение имеет конфиденциальность и целостность данных, то в АСУ ТП основной акцент делается на безопасности физических процессов и обеспечении отказоустойчивости, что делает подходы к управлению рисками в этих двух типах систем существенно различными.

Таким образом, на основе представленного сравнения можно заключить, что применение методов и стандартов информационной безопасности, разработанных для ИТ систем, к системам управления технологическим процессом является неприменимым и может представлять серьезные риски для безопасности и надежности производственных процессов. В обычной ИТ системе необходимо уделять особое внимание безопасности на промышленных предприятиях. Использование межсетевых экранов, антивирусного программного обеспечения, DLP-систем и защиты от спама в сочетании с проактивным мониторингом, а также управлением сетевым оборудованием, программным обеспечением и трафиком может значительно уменьшить риск атак. Тем не менее, технические решения в области информационной безопасности не способны полностью устраниć все угрозы для систем промышленного предприятия.

В контексте информационной безопасности промышленных предприятий, важно учитывать, что технические средства, такие как межсетевые экраны, антивирусное ПО, DLP-системы и защита от спама, при поддержке проактивного мониторинга и управления сетевым оборудованием, могут существенно снизить риск кибератаки. Однако, не следует рассматривать их как панацею от всех угроз для систем промышленного предприятия. Важно понимать, что угрозы могут исходить не только от злоумышленников, но и от не-преднамеренных действий персонала, отказов оборудования или воздействия окружающей среды.

Основные задачи информационной безопасности в промышленности включают:

- 1) Защиту технологических процессов, включая автоматизированные системы управления технологическим процессом (АСУ ТП);
- 2) Обеспечение безопасности корпоративных ресурсов, таких как информационная инфраструктура и веб-ресурсы;
- 3) Защиту конечных устройств от угроз;
- 4) Защиту чувствительной информации и персональных данных;
- 5) Соблюдение требований регуляторов в области безопасности;
- 6) Предотвращение утечек информации;
- 7) Выявление внутренних нарушений и недобросовестных действий сотрудников.

Таким образом, для обеспечения информационной безопасности промышленных предприятий предлагаем реализовать комплексный подход, включающий как технические средства, так и стратегии управления персоналом и рисками.

Цели взлома АСУ ТП могут быть разнообразными и включают:

1. Кражу коммерческой тайны и интеллектуальной собственности для получения конфиденциальной информации о технологиях производства, патентах, проектах и других коммерчески значимых данных, которые могут быть использованы для незаконного обогащения или конкурентных преимуществ.
2. Промышленный саботаж для нарушение нормального функционирования промышленного процесса, что может привести к простоям, ущербу оборудованию, потере продукции и финансовым убыткам для предприятия.
3. Вымогательство прерыванием производственных процессов или утечкой конфиденциальной информации для получения выкупа.

4. Повреждение информационных систем предприятия для нанесения ущерба информационным системам предприятия путем потери данных, нарушения работы производственных процессов и финансовым потерям.

Примером может служить ситуация, когда хакеры взламывают систему управления производством на заводе с целью изменить параметры производственного процесса так, чтобы продукция вышла с дефектами или была несоответствующего качества. Это может привести к значительным убыткам для предприятия и потере репутации на рынке.

На представленном рис. 1 показана статистика с указанием процентов компьютеров, на которых были блокированы угрозы продуктами «Лаборатории Касперского». Видно, что вредоносные объекты, которые блокируются на компьютерах АСУ ТП, относятся ко многим категориям.

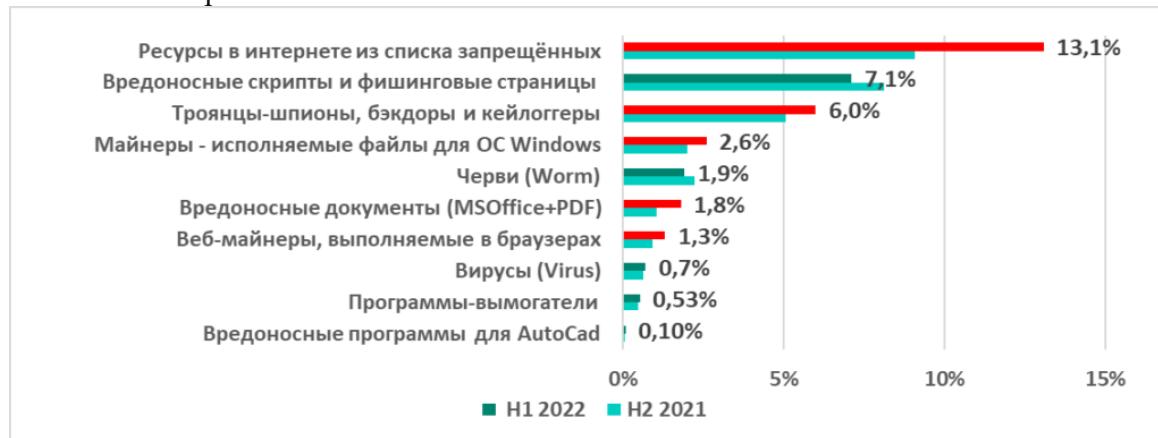


Рис. 1- Процент компьютеров АСУ, на которых была предотвращена активность вредоносных объектов различных категорий, первое полугодие 2022 и второе полугодие 2021
Fig. 1- Percentage of ICS computers on which the activity of malicious objects of various categories was prevented, first half of 2022 and second half of 2021

Обсуждение результатов. Профилактические меры и методы устранения уязвимостей в системах АСУ ТП включают в себя следующее:

1. Проведение регулярных тренингов по информационной безопасности для повышения осведомленности сотрудников;
2. Аудит информационной безопасности и сканирование сети для выявления и предотвращения эксплуатации уязвимостей, а также своевременного внедрения обновлений (патчей);
3. Корректная сегментация сети для улучшения контроля за трафиком и повышения эффективности систем безопасности;
4. Использование специализированных систем защиты АСУ ТП для обеспечения непрерывности производственных процессов;
5. Применение технологии NTA (Network Traffic Analysis) для обнаружения аномалий в сетевом трафике и выявления кибератак на ранних этапах;
6. Реализация межсетевых экранов и систем обнаружения и предотвращения вторжений (IDS/IPS) для защиты периметра сети и обнаружения вредоносного трафика;
7. Внедрение WAF (Web Application Firewall) для защиты веб-ресурсов от различных атак, таких как XSS, SQL-инъекции и CSRF;
8. Защита конечных точек для снижения риска заражения вирусами и обеспечения соответствия политикам безопасности;
9. Обеспечение безопасного удаленного доступа к сети с помощью VPN и криптографической защиты информации (СКЗИ);
10. Внедрение DLP систем для предотвращения утечек конфиденциальной информации;
11. Использование систем управления доступом для контроля за учетными записями и правами доступа;

12. Внедрение решений для управления сетевым доступом (NAC) для обеспечения видимости и контроля за подключениями к сети;
13. Применение систем классификации данных для повышения безопасности конфиденциальной информации и ее управления;
14. Использование интерактивных ловушек для обнаружения АРТ-атак;
15. Внедрение SIEM систем для централизованного мониторинга безопасности и анализа данных от различных инструментов безопасности.

В стране активно занимаются разработкой нормативных актов, чтобы регулировать вопросы, связанные с обеспечением безопасности промышленных систем автоматизации. Один из ключевых результатов этой работы - приказ ФСТЭК РФ № 31, который начал действовать в 2014 году.

Однако до сих пор отсутствуют методические руководства, которые разъяснили бы меры по защите информации, выявлению и устраниению уязвимостей, а также реагированию на инциденты, связанные с нарушением защиты информации в системах автоматизации на производстве, указанные в приказе № 31. Из-за этого возник переходный период: в настоящее время при обеспечении безопасности систем автоматизации на производстве согласно требованиям приказа № 31 возникает необходимость в принятии решений по неустановленным вопросам. Например, можно опираться на методические документы ФСТЭК, касающиеся ключевых систем информационной инфраструктуры (КСИИ) и других типов систем. Однако приказ № 31 имеет ряд особенностей по сравнению с ранее выпущенными документами ФСТЭК, обусловленных спецификой промышленных систем автоматизации.

Первая особенность – уникальные требования к безопасной разработке программного обеспечения (ОБР).

Другая особенность заключается в распределении обязанностей участников процесса защиты АСУ ТП (заказчик/оператор/разработчик) при определении уровня защищенности, от которого зависит набор мер защиты информации в АСУ ТП, а также используемые средства защиты информации.

Третья особенность – использование средств защиты информации, которые выбираются в соответствии с требованиями заказчика, в соответствии с Федеральным законом № 187-ФЗ «О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации». Еще один важный аспект, вызывающий дискуссии в профессиональном сообществе, – определение структурного подразделения или должностного лица (работника), ответственного за защиту информации в системах автоматизации на производстве в соответствии с приказом № 31.

Алгоритм действий для защиты системы АСУ ТП. В первую очередь, для построения системы защиты АСУ ТП необходимо понять, является ли система субъектом КИИ. Критическая информационная инфраструктура (сокращенно - КИИ) - это информационные системы, информационно-телекоммуникационные сети, автоматизированные системы управления субъектов КИИ, а также сети электросвязи, используемые для организации их взаимодействия. В свою очередь, субъекты КИИ - это компании, работающие в стратегически важных для государства областях, таких как здравоохранение, наука, транспорт, связь, энергетика, банковская сфера, топливно-энергетический комплекс, в области атомной энергии, оборонной, ракетно-космической, горнодобывающей, металлургической и химической промышленности, а также организаций, обеспечивающие взаимодействие систем или сетей КИИ. Чтобы определить, относится ли система к субъектам критической информационной инфраструктуры (КИИ), необходимо реализовать ряд шагов в рамках Постановления Правительства РФ № 127 от 02.02.2018 «О категорировании объектов критической информационной инфраструктуры Российской Федерации».

Согласно 187-ФЗ от 26.07.2017 и ПП РФ № 127 от 02.02.2018 необходимо установить, относится ли система к перечню сфер деятельности организаций. Так же отношение

к субъекту КИИ можно проверить по кодам ОКВЭД и лицензиям на осуществление деятельности организации. Далее, если по результатам анализа мы приходим к решению, что система не является КИИ, то он всё равно требует защиты в соответствии с общими требованиями к информационной безопасности систем АСУ ТП. Действительно, по результатам оценки можно прийти к выводу, что не будет объектов КИИ, подлежащих категорированию – в этом случае нет необходимости направлять сведения в регуляторные органы. Если же мы приходим к выводу что наша система является КИИ, необходимо совершить ряд действий :

Категорирование объектов КИИ:

1. Определяем принадлежность организации к субъектам КИИ в соответствии с 187-ФЗ
2. Определяем процессы организации и составляем их перечень (управленческие, технологические, финансово-экономические, производственные).
3. Выявляем критичные объекты и процессы, которые обрабатывают информацию, необходимую для обеспечения выполнения критических процессов и (или) осуществляют управление, контроль или мониторинг критических процессов.
4. Проводим анализ возможных последствий реализации угроз безопасности информации для объектов КИИ.
5. Присваиваем объекту одну из категорий значимости: первая (высшая), вторая или третья.

Регистрация объектов КИИ:

Готовим Акт категорирования объектов КИИ для отправки во ФСТЭК.

Разработка и реализация мер защиты:

1. Разрабатываем локальные нормативные акты и политики информационной безопасности.
2. Реализуем организационные меры защиты (назначение ответственных лиц, проведение инструктажей и обучения персонала).
3. Внедряем технические средства защиты информации (системы контроля доступа, межсетевые экраны, системы обнаружения вторжений и т.д.).
4. Обеспечиваем криптографическую защиту информации в соответствии с требованиями законодательства.

Проведение оценки соответствия:

1. Проводим регулярные проверки и оцениваем соответствие системы защиты информации требованиям законодательства и нормативных документов.
2. Проводим аудит и тесты на проникновение для выявления уязвимостей.

Мониторинг и реагирование на инциденты:

1. Организуем системы мониторинга и реагирования на инциденты информационной безопасности.
2. Создаем и поддерживаем в актуальном состоянии план реагирования на инциденты.
3. Взаимодействуем с уполномоченными органами (ФСТЭК, ФСБ, ГосСОПКА) в случае выявления инцидентов.

Обеспечение непрерывности и восстановление деятельности:

1. Разрабатываем и внедряем план обеспечения непрерывности деятельности АСУ ТП.
2. Реализуем мероприятия по восстановлению системы АСУ ТП в случае инцидента.

Проведение регулярных обучений и тренингов:

1. Обучаем сотрудников правилам и методам защиты информации.
2. Проводим регулярные тренировки по реагированию на инциденты и восстановлению системы.

Эти действия должны быть интегрированы в общую стратегию управления рисками и информационной безопасностью предприятия, обеспечивая тем самым надежную защиту критической информационной инфраструктуры.

Вывод. Результаты исследования подтверждают важность комплексного подхода к обеспечению информационной безопасности в АСУ ТП, учитывающего как технические, так и организационные аспекты.

Разработанный алгоритм действий поможет предприятиям соответствовать требованиям регуляторов и минимизировать риски кибератак и обеспечить защиту критически важных производственных процессов.

Внедрение предложенных мер и стратегий повысит общую устойчивость промышленных систем к современным угрозам информационной безопасности. Новым знанием, полученным в результате данного исследования, является выявление критических различий между ИТ-системами и АСУ ТП, что позволяет более точно разрабатывать стратегии и методы защиты для промышленных систем.

Кроме того, были предложены конкретные профилактические меры и методики устранения уязвимостей, адаптированные к особенностям АСУ ТП. Также важным результатом является разработка алгоритма действий для категорирования и защиты систем АСУ ТП. Становится очевидным, что обеспечение информационной безопасности в промышленных системах автоматизации является крайне важным аспектом современной промышленности. Развитие цифровых технологий и интернета вещей (IoT) влечет за собой не только новые возможности, но и новые угрозы, связанные с кибератаками и нарушениями информационной безопасности. Стандарты и нормативные документы, такие как приказ ФСТЭК России № 31, 187-ФЗ «О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации играют важную роль в обеспечении безопасности систем автоматизации, однако их применение требует дополнительных методологий и практических решений для решения конкретных проблем безопасности.

Также важно отметить, что уникальные характеристики и требования промышленных систем автоматизации делают их особенно уязвимыми перед новыми угрозами, и необходимо продолжать развивать и совершенствовать методы защиты, а также повышать квалификацию персонала, работающего с этими системами.

Библиографический список:

1. Промышленная безопасность [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.evraas.ru/industries/manufacturing/>. – Загл. с экрана.
2. Угрозы информационной безопасности систем промышленной автоматизации в России [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://ics-cert.kaspersky.ru/publications/reports/2022/09/20/threat-landscape-for-industrial-automation-systems-in-russia/>. – Загл. с экрана.
3. Архитектура и безопасность систем управления промышленными предприятиями [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://habr.com/ru/post/316184/>. – Загл. с экрана.
4. NIST SP 800-82: Руководство по безопасности систем промышленной автоматизации и управления [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://csrc.nist.gov/publications/detail/sp/800-82/rev-2/final>. – Загл. с экрана.
5. Категорирование объектов критической информационной инфраструктуры (КИИ). Практические примеры [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://rtmtech.ru/articles/kategorirovaniye-obektov-kiii-primeru>
6. КИИ - что это? Безопасность объектов критической информационной инфраструктуры [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.securityvision.ru/blog/kiii-cto-eto/>
7. Федеральный Закон «О безопасности КИИ РФ» от 26.07.2017;
8. Федеральный закон «О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации» от 26.07.2017 N 187-ФЗ
9. Федеральный закон «Об информации, информационных технологиях и о защите информации» от 27.07.2006 N 149-ФЗ
10. Гордиенко В.В., Лисицин А.Л. Технические и организационные методы борьбы с внутренними угрозами утечки информации организаций и предприятий // Auditorium. 2019. № 4 (24). [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/tehnicheskie-i-organizatsionnye-metody-borby-s-vnutrennimi-ugrozami-utechki-informatsii-i-organizatsiy-i-predpriyatiy>

11. Андреев Ю.С., Дергачев А.М., Жаров Ф.А., Садырин Д.С. Информационная безопасность автоматизированных систем управления технологическими процессами. Текст научной статьи по специальности «Компьютерные и информационные науки», университет ИТМО, 2019

References:

1. Industrial safety [Electronic resource] – Access mode: <https://www.evraas.ru/industries/manufacturing/>. – Title from the screen. (In Russ)
2. Threats to information security of industrial automation systems in Russia [Electronic resource] – Access mode: <https://ics-cert.kaspersky.ru/publications/reports/2022/09/20/threat-landscape-for-industrial-automation-systems-in-russia/>. – Title from the screen. (In Russ)
3. Architecture and security of industrial enterprise control systems [Electronic resource] – Access mode: <https://habr.com/ru/post/316184/>. – Title from the screen. (In Russ)
4. NIST SP 800-82: Guide to Industrial Automation and Control Systems Security [Electronic resource] - Access mode: <https://csrc.nist.gov/publications/detail/sp/800-82/rev-2/final>. - Title from the screen. (In Russ)
5. Categorization of critical information infrastructure (CII) objects. Practical examples [Electronic resource] - Access mode: <https://rtmtech.ru/articles/kategorirovanie-obektov-kii-primery/> (In Russ)
6. CII - what is it? Security of critical information infrastructure objects [Electronic resource] - Access mode: <https://www.securityvision.ru/blog/kii-chto-eto/> (In Russ)
7. Federal Law "On the Security of Critical Information Infrastructure of the Russian Federation" dated July 26, 2017; (In Russ)
8. Federal Law "On the Security of Critical Information Infrastructure of the Russian Federation" dated July 26, 2017 N 187-FZ (In Russ)
9. Federal Law "On Information, Information Technologies and Information Protection" dated July 27, 2006 N 149-FZ (In Russ)
10. Gordienko V.V., Lisitsyn A.L. Technical and organizational methods for combating internal threats of information leakage of organizations and enterprises. *Auditorium*. 2019;4 (24). [Electronic resource] – Access mode: <https://cyberleninka.ru/article/n/tehnicheskie-i-organizatsionnye-metody-borby-s-vnutrennimi-ugrozami-utechki-informatsii-organizatsiy-i-predpriyatiy> (In Russ)
11. Andreev Yu.S., Dergachev A.M., Zharov F.A., Sadyrin D.S. Information security of automated process control systems. Text of scientific article on the specialty "Computer and Information Sciences", ITMO University, 2019 (In Russ)

Сведения об авторах:

Айдинян Андрей Размикович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Вычислительные системы и информационная безопасность»; andstyle@mail.ru; ORCID 0000-0001-9455-4079

Кирсанов Дмитрий Георгиевич, студент, кафедра «Вычислительные системы и информационная безопасность»; dmitriy5688@yandex.ru

Information about authors:

Andrey R. Aydinyan, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Assoc. Prof., Department of Computing Systems and Information Security; andstyle@mail.ru; ORCID 0000-0001-9455-4079

Dmitry G. Kirsanov, Student, Department of Computing Systems and Information Security; dmitriy5688@yandex.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 29.09.2024.

Одобрена после рецензирования/ Reviced 06.11.2024.

Принята в печать/Accepted for publication 20.01.2025.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 681.511.26



DOI: 10.21822/2073-6185-2025-52-1-49-56

Оригинальная статья/ Original article

**Моделирование движения линейных объектов управления
к внешней функциональной траектории**

В.В. Афонин

Национальный исследовательский Мордовский государственный университет
им. Н.П. Огарёва,
430005, г. Саранск, ул. Большевистская, д. 68, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является моделирование поведения динамических объектов управления. Рассматриваются объекты управления, математическая модель которых соответствует описанию типовых динамических звеньев, например, колебательные, инерционные. **Метод.** Применяются подходы, свойственные линейной задаче быстродействия и краевой задаче для обыкновенных дифференциальных уравнений. Решения определяются программным путем с помощью традиционных вычислительных пакетов. **Результат.** Экспериментально-моделируемые результаты показывают возможность перевода заданного объекта управления из нулевого состояния в расчетную точку внешней траектории движения чего-либо. **Вывод.** На основе модельных примеров показана возможность решения краевой задачи для объектов управления, которые могут быть как устойчивыми, так и неустойчивыми по их полюсам.

Ключевые слова: моделирование, типовые динамические звенья, внешняя траектория, скачкообразное управление, маркеры цели, движение объекта управления, программирование

Для цитирования: В.В. Афонин. Моделирование движения линейных объектов управления к внешней функциональной траектории. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025;52(1):49-56.
DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-1-49-56

Modeling the motion of linear control objects to an external functional trajectory
V.V. Afonin

N.P. Ogarev National Research Mordovia State University,
68/1 Bolshevikskaia St., Saransk 430005, Russia

Abstract. Objective. The aim of the study is to model the behavior of dynamic control objects. The control objects are considered, the mathematical model of which corresponds to the description of typical dynamic links, for example, oscillatory, inertial. **Method.** Approaches inherent to the linear problem of speed and the boundary value problem for ordinary differential equations are used. Solutions are determined programmatically using traditional computing packages. **Result.** The results show the possibility of transferring a given control object from the zero state to the calculated point of the external trajectory of movement. **Conclusion.** The possibility of solving a boundary value problem for control objects that can be both stable and unstable at their poles is shown.

Keywords: modeling, typical dynamic links, external trajectory, jump-like control, target markers, movement of the control object, programming.

For citation: V.V. Afonin. Modeling the motion of linear control objects to an external functional trajectory. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2025; 52(1):49-56. (In Russ) DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-1-49-56

Введение. В теории автоматического управления и оптимального управления принято выделять звенья и объекты по характеру дифференциальных уравнений, описывающих звенья и объекты [1, 2, 3]. Если звено описывается обыкновенным дифференциальным уравнением с постоянными коэффициентами не выше второго порядка, то такое звено принято называть типовым или элементарным [3].

Типовое динамическое звено – это математическая модель элемента системы автоматического управления (САУ), отражающая определенные динамические свойства элемента вне зависимости от физической природы протекающих в нем процессов. Именно эта абстракция позволяет проводить широкие исследования, как на аналитическом, так и на математико-программном уровне. В качестве базовой математической модели исследуемых объектов управления приняты такие, которые состоят из колебательных и апериодических (инерционных) звеньев первого порядка. Для таких объектов ставится задача их перевода из нулевого состояния в некоторую точку цели внешней траектории чего-либо. Например, внешние траектории могут отображать движение летательных и беспилотных летательных аппаратов [4, 5, 6].

Постановка задачи. Перевод объекта управления из одного состояния в некоторое заданное другое рассматривается с помощью методов теории оптимального управления [1, 7, 8, 9], а также с помощью методов решения краевых задач обыкновенных дифференциальных уравнений [10–12]. При решении задач управления с краевыми условиями принято использовать методы оптимального управления, например, методы оптимального по быстродействию управления динамическими объектами [1, 13, 14]. При рассмотрении задач оптимального управления учитываются особенности структурных схем объектов управления, представленных в виде некоторой совокупности отдельных звеньев [15, 16].

Далее рассматриваются объекты управления, представленные в виде параллельного соединения типовых звеньев – двух колебательных звеньев и одного апериодического звена первого порядка. На модельной внешней траектории движения чего-либо (возможно дрона) фиксируются маркеры цели, к которым необходимо сформировать движение объекта управления, находящегося в нулевом исходном состоянии. Предполагается, что рассмотрение движения осуществляется в прямоугольной декартовой системе координат.

Методы исследования. Математическое описание звеньев объекта управления задаются в виде следующих обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$T_1^2 \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + 2\xi T_1 \frac{dx(t)}{dt} + x(t) = \alpha_1 u(t); \quad (1)$$

$$T_2^2 \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + 2\xi T_2 \frac{dx(t)}{dt} + x(t) = \alpha_2 u(t); \quad (2)$$

$$T_3 \frac{dx(t)}{dt} + x(t) = \alpha_3 u(t); \quad (3)$$

$$T_1^2 \frac{d^2 x(t)}{dt^2} - 2\xi T_1 \frac{dx(t)}{dt} + x(t) = \alpha_1 u(t); \quad (4)$$

$$T_2^2 \frac{d^2 x(t)}{dt^2} - 2\xi T_2 \frac{dx(t)}{dt} + x(t) = \alpha_2 u(t); \quad (5)$$

$$T_3 \frac{dx(t)}{dt} - x(t) = \alpha_3 u(t), \quad (6)$$

где $T_1 > 0$, $T_2 > 0$ – постоянные времени колебательных звеньев (1), (2), (4), (5) и одного инерционного звена с постоянной времени $T_3 > 0$, $0 < \xi < 1$ – коэффициент демпфирования колебательных звеньев, α_i – статические коэффициенты передачи, $i = 1, 2, 3$.

Для статических коэффициентов передачи принято условие в соответствии с примерами из [17]:

$$\sum_{i=1}^3 \alpha_i = 1. \quad (7)$$

Уравнения (4), (5), (6) описывают неустойчивые звенья [2, 18]. Структурная схема исследования объектов управления представляет собой параллельное соединение типовых звеньев с заданными параметрами, как показано на рис. 1.

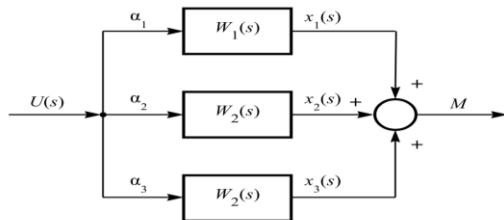


Рис. 1 - Структурная схема объектов управления
 Fig. 1- Structural diagram of control objects

На рис. 1 представлены передаточные функции, отвечающие соответствующим дифференциальным уравнениям (1), (2), (3) или (4), (5), (6). Вид таких передаточных функций хорошо известен [2, 3]. В случае решения линейной задачи быстродействия может быть применена теорема об n -интервалов Фельдбаума А.А. для объектов управления, чьи полюса являются вещественными отрицательными или нулевыми, а управление допустимо максимально с возможным изменением знаков за период управления [15, 17].

Следуя [18], сумматор на рис. 1 реализует следующую операцию:

$$x_1(t) + x_2(t) + x_3(t) = M, \quad (8)$$

где: M – константа на гиперплоскости в соответствии с уравнением (8).

Предполагается, что в начальный момент времени $t = 0$, переменные состояния объекта управления должны быть нулевыми: $x_1(0) = x_2(0) = x_3(0) = 0$. Для схемы объекта управления, представленного на рис. 1, требуется один интервал максимально-допустимого управления (положительного или отрицательного). При заданной величине M задача сводится к определению момента окончания управляющего воздействия [17]. Для снятия точек с внешней траектории принимаются следующие функциональные зависимости, моделирующие внешние траектории движения чего-либо:

$$f_1(x) = 153 \cdot |0,4 \cos(0,015x) - 0,035| \cdot (x^{-0,0015x}) + e^{-0,053x} + 5,3; \quad (9)$$

$$f_2(x) = -\sqrt{\frac{2x^3 - 42x^2 + 240x}{125}} + 35; \quad (10)$$

$$f_3(x) = 953 \frac{\sin(0,153 \cdot x)}{x}. \quad (11)$$

Уравнения (9), (10), (11) сформированы на основе [19, 20]. В частности, уравнение траектории (10) без слагаемого 35 в соответствии с [20] называется «Кривая рыбака» в случае знака \pm перед корнем квадратным. Некоторые подходы к программированию задач аналитической геометрии даны в [21], которые были использованы при разработке предлагаемой методике вывода объекта управления в точку модельной внешней траектории.

Обсуждение результатов. Приведенные дифференциальные уравнения (1) – (6) формально могут быть записаны относительно независимой переменной x , как это принято в теории обыкновенных дифференциальных уравнений [22]. Опираясь на изложенный материал, предлагается производить решение дифференциальных уравнений (1) – (6),

интегрируя сначала относительно входного постоянного управления при заданной координаты M внешней траектории движения чего-либо. А потом, подставляя найденное постоянное управление в исходные дифференциальные уравнения, найти общее уравнение движения объекта управления (ОУ). Схема предлагаемого алгоритма решения рассматриваемой задачи показана на рис. 2.

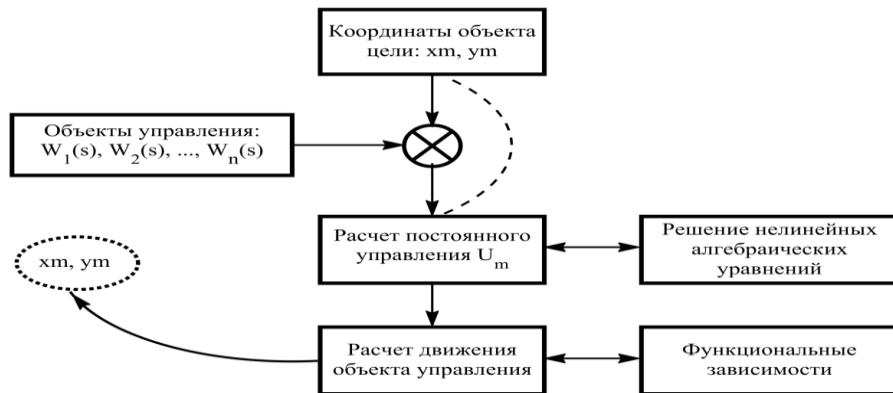


Рис. 2 - Схема вывода объекта управления в точку внешней траектории
Fig. 2 - Scheme of output of the control object to the point of the external trajectory

Приведем параметры звеньев (устойчивых и неустойчивых) исследуемых объектов управления: $T_1 = 2,3$ (усл. ед.); $T_2 = 1,15$ (усл. ед.); $T_3 = 1,53$ (усл. ед.); $\alpha_1 = 0,2$ (усл. ед.); $\alpha_2 = 0,3$ (усл. ед.); $\alpha_3 = 0,5$ (усл. ед.); $\xi = 0,05$ (относительный коэффициент демпфирования колебательных звеньев). Программная реализация схемы рис. 2 была выполнена как в MATLAB, так и с помощью Питона (Python). Результаты проведенного моделирования для внешней траектории (9) и заданных дифференциальных уравнений (1) – (6) с учетом параметров звеньев сведены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты вывода объектов управления на траекторию (9)
Table 1. Results of outputting control objects to the trajectory (9)

№ п/п	Управление неустойчивым объектом управления, усл. ед. Control of an unstable control object, conventional units	Управление устойчивым объектом управления, усл. ед. Control of a stable control object, conventional units	X-координата, усл. ед. X-coordinate, con- ventional units	Y-координата, усл. ед. Y-coordinate, conventional units
1	1.53100200795961	64.9564479108299	6.68896321070234	60.4897625144916
2	9.0148892049463e-08	43.6230794939201	31.7725752508361	47.0607205991632
3	4.9642144393488e-22	15.2256901061837	80.2675585284281	15.0999645088432
4	1.06749564218036e-27	5.33852298274691	98.6622073578595	5.40580588952096
5	1.48294106494829e-32	12.7860368524329	117.056856187291	12.5022209883224
6	8.49073835885867e-43	19.7011612309200	153.846153846154	19.8402264343567
7	3.02501233902200e-53	19.5582585892736	190.635451505017	19.5914329882999
8	8.58127195073736e-64	15.3664588150038	227.424749163880	15.4038260110179
9	4.80012583229948e-85	6.61791215076245	301.003344481605	6.61919742072604
10	1.60426094171674e-95	6.13092394842988	337.792642140468	6.13148413071638
11	7.52764965741246e-127	6.12599015585984	448.160535117057	6.12581189078810
12	2.48878154910767e-137	5.61344581458496	484.949832775920	5.61343790540170

В табл. 1 символ «е» определяет собой экспоненциальную форму представления в данном случае малого числа. Графическая интерпретация результатов табл. 1 показана на рис. 3 и на рис. 4. Из рис. 4 по сравнению с рис. 3 можно сделать заключение, что неустойчивый объект в определенной степени «выпрямляет» траектории движения объекта управления.

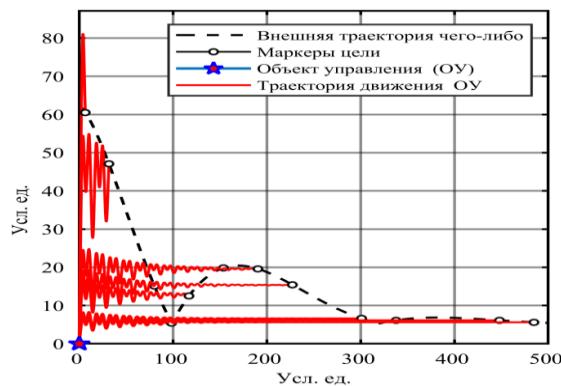


Рис. 3 - Вывод устойчивого объекта на внешнюю траекторию (9) чего-либо

Fig. 3 - Bringing a stable object to the external trajectory (9) of something

Результаты программно-численного моделирования для внешней траектории (10) чего-либо и заданных дифференциальных уравнений (1) – (6) с учетом параметров звеньев сведены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты вывода объектов управления на траекторию (10)

Table 2. Results of outputting control objects to the trajectory (10)

№ п/п	Управление неустойчивым объектом управления, усл. ед. Control of an unstable control object, conventional units	Управление устойчивым объектом управления, усл. ед. Control of a stable control object, conventional units	X-координата, усл. ед. X-coordinate, conventional units	Y-координата, усл. ед. Y-coordinate, conventional units
1	104.934402778719	148.078569636877	0.655518394648829	33.9423036746312
2	0.828728192674316	35.9485074331404	6.71906354515050	33.3922034392907
3	0.00126181845065293	32.9731862743380	16.5518394648829	31.4955169333361
4	0.000138549379667714	26.8442409069638	19.8294314381271	29.4585102658880
5	1.49642680857725e-05	26.0856577563494	23.1070234113712	27.1028051905186
6	1.58682895418889e-06	23.1544475729942	26.3846153846154	24.4817167221387
7	1.64546552433915e-07	28.0449694865731	29.6622073578595	21.6248719771180
8	1.65722393199222e-08	16.1342854072826	32.9397993311037	18.5523516940490
9	1.60225436742973e-09	16.0051569375310	36.2173913043478	15.2792574174158
10	1.45481217225637e-10	10.3819207259786	39.4949832775920	11.8176390620524
11	7.40931032282361e-13	4.19731392596699	46.0501672240803	4.36724547430186
12	2.01443869267938e-13	2.52213541220598	47.3612040133779	2.79721003832015

Графическая интерпретация результатов табл. 2 показана на рис. 5 и на рис. 6.

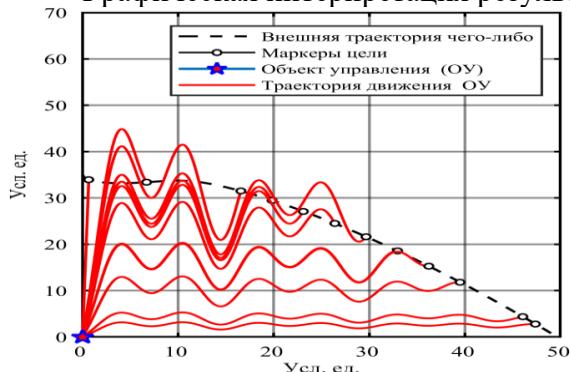


Рис. 5 - Вывод устойчивого объекта на внешнюю траекторию (10) чего-либо

Fig. 5 - Bringing a stable object to the external trajectory (10) of something

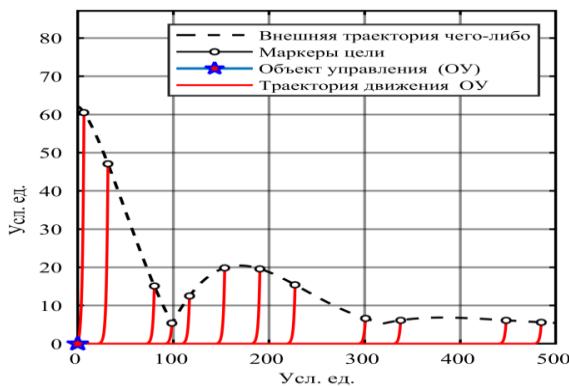


Рис. 4 - Вывод неустойчивого объекта на внешнюю траекторию (9) чего-либо

Fig. 4 - Bringing an unstable object to the external trajectory (9) of something

Результаты программно-численного моделирования для внешней траектории (10) чего-либо и заданных дифференциальных уравнений (1) – (6) с учетом параметров звеньев сведены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты вывода объектов управления на траекторию (10)

Table 2. Results of outputting control objects to the trajectory (10)

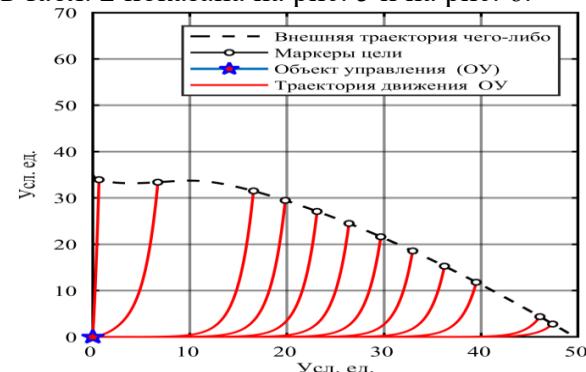


Рис. 6 - Вывод неустойчивого объекта на внешнюю траекторию (10) чего-либо

Fig. 6 - Bringing an unstable object to the external trajectory (10) of something

Результаты программно-численного моделирования для внешней траектории (11) чего-либо и заданных дифференциальных уравнений (1) – (6) с учетом параметров звеньев сведены в табл. 3. Графическая интерпретация результатов табл. 3 показана на рис. 7-8.

Таблица 3. Результаты вывода объектов управления на траекторию (11)

Table 3. Results of outputting control objects to the trajectory (11)

№ п/ п	Управление неустойчивым объектом управления, усл. ед. Control of an unstable control object, conventional units	Управление устойчивым объектом управления, усл. ед. Control of a stable control object, conventional units	X-координата, усл. ед. X-coordinate, conventional units	Y-координата, усл. ед. Y-coordinate, conventional units
1	130.625456979984	253.057779173788	1.50501672240803	144.523869774739
2	0.566219838693314	93.0367379274073	9.03010033444816	103.652817285454
3	0.0117027081275775	87.2532642495650	14.0468227424749	56.8100296030409
4	0.000495041478246916	20.8373753553715	17.5585284280936	23.8588073590797
5	-5.3335872467448e-06	-18.3892927453447	24.3311036789298	-21.4999060138490
6	-2.02388867318283e-09	-18.9810927962086	36.1204013377926	-18.1145082605818
7	4.71529948191318e-12	12.6335854847770	44.6488294314381	11.1215602905579
8	2.76932727946069e-14	15.8148375128981	53.1772575250836	17.2126299918247
9	1.03738991924799e-16	4.75592417259797	59.6989966555184	4.57749204414243
10	-2.98410703318549e-18	-9.30891555748225	66.2207357859532	-9.34786854079103
11	-3.56377561351264e-19	-12.9555968936520	69.9832775919732	-13.0561711818071
12	-1.67968748206755e-20	-11.8365475217377	74.4983277591973	-11.7690852886874

Маркеры цели на графиках рис. 3, рис. 5, рис. 7, соответственно на рис. 4, рис. 6, рис. 8, «назначены» довольно произвольно с целью разметить характерные участки заданных внешних траекторий.

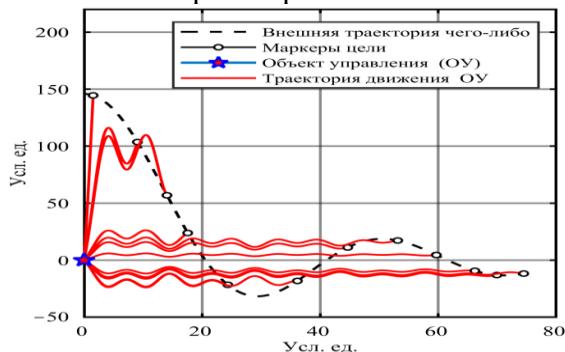


Рис. 7 - Вывод устойчивого объекта на внешнюю траекторию (11) чего-либо

Fig. 7- Bringing a stable object to the external trajectory (11) of something

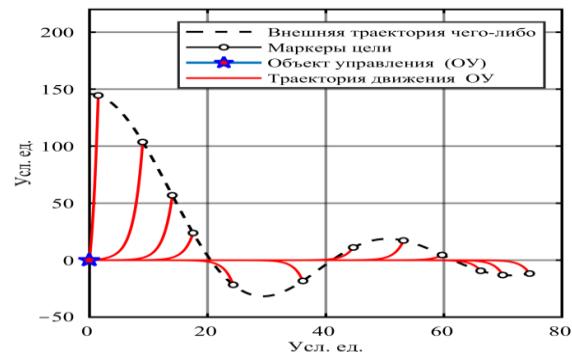


Рис. 8 - Вывод неустойчивого объекта на внешнюю траекторию (11) чего-либо

Fig. 8 - Bringing an unstable object to the external trajectory (10) of something

Исследованию динамических объектов управления посвящено достаточно много работ и публикаций. В частности, задачам оптимального управления как линейных, так и нелинейных объектов управления [9, 15, 23, 24]. В ряде случаев предлагаются эвристические решения [1]. Также здесь предлагается эвристическое решение моделирования двухточечной задачи управления. В отличие от классических краевых задач [12] можно предположить, что аппарат теории автоматического управления и оптимизации более восприимчив для конструктивного решения задач управления, включая необходимое программирование для получения численных результатов.

Вывод. Изложенные в статье результаты моделирования вывода объекта управления в точку внешней траектории движения чего-либо могут быть распространены на объекты управления с той или иной степенью астатизма. Кроме того, объекты могут состоять из последовательного соединения звеньев, когда на входе скалярное управление. Приведенные результаты моделирования могут быть распространены на реальные практические задачи управления с целью обоснования необходимой структуры даже в плане применения неустойчивых звеньев, составляющих объект управления.

Библиографический список:

1. Теория автоматического управления: учеб. для вузов / С.Е. Душин, Н.С. Зотов, Д.Х. Имаев [и др.]; под ред. В.Б. Яковлева. – 2-е изд., перераб. – М.: Высш. шк., 2005. – 567 с.
2. Яковлева Д.А. Теория автоматического управления: учебное пособие. / Д.А. Яковлева, Е.Б. Биктеева. – М.: ИД Академии Жуковского, 2018. – 80 с.
3. Шамшина И.Г. Основы автоматического управления машиностроительными объектами и системами: учебное пособие для вузов / Политехнический институт ДВФУ. – Владивосток: Изд-во Дальневост. федерал. ун-та, 2024. – 128 с.
4. Методы оптимизации управления летательными аппаратами : учебное пособие / Соловьев В.А., Бетанов В.В., Корянов В.В. ; ред. Соловьев В. А.; МГТУ им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский ун-т). – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2022. – 194 с.
5. Соколов С.В., Охотников А.Л. Робастное позиционирование беспилотных объектов с использованием спутниковых измерений и данных цифровой модели пути // Мехатроника, автоматизация, управление. 2024; 25(7): С. 372-379. – <https://doi.org/10.17587/mau.25.372-379>
6. Деменков Н.П., Цзоу К. Метод прогнозирования траектории на основе графовой модели для беспилотного вождения // Автоматизация. Современные технологии. 2022. Т. 76. № 9. С. 408-413.
7. Ловчаков В.И., Шибякин О.А. Решение задачи быстродействия по выходной координате для линейных динамических систем // Мехатроника, автоматизация, управление. 2019. Т. 20. № 9. С. 532-541.
8. Yang X.-S. Nature-Inspired Optimization Algorithms, 2nd Edition. – Academic Press, 2020. – 310 р.
9. Р.В. Гусейнов, М.Р. Гусейнова, К.А. Алиева. Некоторые вопросы многокритериальной оптимизации параметров сложных систем. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023; 50(2): 67-75. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-2-67-75
10. Shampine, L.F., and J. Kierzenka. "A BVP Solver based on residual control and the MATLAB PSE." ACM Trans. Math. Softw. Vol. 27, Number 3, 2001, pp. 299-316.
11. Shampine, L.F., and J. Kierzenka. "A BVP Solver that Controls Residual and Error." J. Numer. Anal. Ind. Appl. Math. Vol. 3(1-2), 2008, pp. 27-41.
12. Крайнов А.Ю., Моисеева К.М. Численные методы решения краевых задач для обыкновенных дифференциальных уравнений: учебное пособие. – Томск: СТТ, 2016. – 44 с.
13. Ловчаков В. И., Ловчаков Е. В., Кретов Е. И. Синтез быстродействующих систем управления с использованием теории аналитического конструирования оптимальных регуляторов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2016. – Т. 17, № 2. – С. 84-93.
14. Ловчаков В.И., Шибякин О.А. Решение задачи быстродействия по выходной координате для линейных динамических систем // Мехатроника, автоматизация, управление. 2019. Т. 20. № 9. С. 532-541.
15. Олейников В.А. Оптимальное управление технологическими процессами в нефтяной и газовой промышленности. – Л.: Недра, 1982. – 216 с.
16. Хорошавин В.С. Структурный синтез управляющих устройств оптимальных систем : [монография] / В.С. Хорошавин. – Киров: Вятский государственный университет, 2020. – 132 с.
17. Олейников В.А., Зотов Н.С., Пришвин А.М. Основы оптимального и экстремального управления: Учеб. пособие (гриф МО СССР). – М.: Высш. школа, 1969. – 296 с.
18. Ким Д.П. Теория автоматического управления. Т.1.Линейные системы . 2-е изд., испр. и доп. -М.: ФИЗМАТЛИТ, 2016. – 312 с.
19. Кривые на плоскости: учеб. пособие / Н.Ф. Попельшева, Т.В. Василькина, В.В. Афонин. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2014. – 256 с.
20. Мир математики: в 40 т. Т. 29: Жузеп Салес, Франсеск Баньюоле. Таинственные кривые. Эллипсы, гиперболы и другие математические чудеса. / Пер. с исп. – М.: Де Агостини, 2014. – 160 с.
21. Александров Э.Э. Программирование на языке С в Microsoft Visual Studio 2010 : учеб. пособие / Э.Э. Александров, В.В. Афонин. – Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2010. – 424 с.
22. Зайцев В.Ф. Обыкновенные дифференциальные уравнения. В 2 частях. Ч. 1: справочник для вузов / В.Ф. Зайцев, А.Д. Поляник. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва: Издательство Юрайт, 2024. – 385 с.
23. Сухинин Б. В., Сурков В. В. Аналитическое конструирование робастных оптимальных по быстродействию систем управления с бесконечно большим коэффициентом усиления // Мехатроника, автоматизация, управление, Том 21, № 8, 2020. С. 453-463. DOI: 10.17587/mau.21.453-463
24. Методы оптимизации управления летательными аппаратами : учебное пособие / Соловьев В.А., Бетанов В.В., Корянов В.В.; ред. Соловьев В.А.; МГТУ им. Н. Э. Баумана (национальный исследовательский ун-т). – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2022. – 194 с.

References:

1. Theory of automatic control: textbook. for universities. S.E. Dushin, N.S. Zotov, D.Kh. Imaev [etc.]; edited by V.B. Yakovleva. – 2nd ed., revised. M.: Higher. school, 2005:567. (In Russ)

2. Yakovleva D.A., E.B. Bikteeva Automatic control theory:a tutorial. M.:Zhukovsky Academy ID, 2018: 80. (In Russ)
3. Shamshina I.G. Fundamentals of automatic control of mechanical engineering objects and systems: a textbook for universities. *Polytechnic Institute of FEFU. – Vladivostok: Publishing house of the Far Eastern Federal University*, 2024:128. (In Russ)
4. Methods of Optimization of Aircraft Control: a tutorial / Soloviev V.A., Betanov V.V., Koryanov V.V.; ed. Soloviev V.A.; Bauman Moscow State Technical University (National Research University). – Moscow: Publishing house of Bauman Moscow State Technical University, 2022:194. (In Russ)
5. Sokolov S.V., Okhotnikov A.L. Robust positioning of unmanned objects using satellite measurements and digital path model data. *Mechatronics, automation, control.* 2024;25(7):372–379. DOI.ORG/10.17587/mau.25.372-379 (In Russ)
6. Demenkov N.P., Zou K. Trajectory prediction method based on a graph model for unmanned driving // Automation. *Modern technologies*. 2022;76(9):408-413. (In Russ)
7. Lovchakov V.I., Shiblyakin O.A. Solution of the problem of high-speed response by the output coordinate for linear dynamic systems. *Mechatronics, automation, control.* 2019;20(9): 532-541. (In Russ)
8. Yang X.-S. Nature-Inspired Optimization Algorithms, 2nd Edition. – Academic Press, 2020:310.
9. R.V. Guseynov, M.R. Guseynova, K.A. Alieva. Some issues of multicriterial optimization of parameters of complex systems. *Herald of the Dagestan State Technical University. Technical sciences*. 2023; 50(2): 67-75. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-2-67-75 (In Russ)
10. Shampine, L.F., and J. Kierzenka. "A BVP Solver based on residual control and the MATLAB PSE." *ACM Trans. Math. Softw.* 2001; 27 (3): 299-316.
11. Shampine, L.F., and J. Kierzenka. "A BVP Solver that Controls Residual and Error." *J. Numer. Anal. Ind. Appl. Math.* 2008; 3(1-2): 27-41.
12. Kraynov A.Yu., Moiseeva K.M. Numerical methods for solving boundary value problems for ordinary differential equations: a tutorial. – Tomsk: STT, 2016:44. (In Russ)
13. Lovchakov V. I., Lovchakov E. V., Kretov E. I. Synthesis of high-speed control systems using the theory of analytical design of optimal controllers. *Mechatronics, automation, control.* 2016;17(2):84-93. (In Russ)
14. Lovchakov V.I., Shiblyakin O.A. Solution of the problem of high-speed response by the output coordinate for linear dynamic systems. *Mechatronics, automation, control.* 2019;20(9):532-541. (In Russ)
15. Oleynikov V.A. Optimal control of technological processes in the oil and gas industry. L.: Nedra, 1982: 216. (In Russ)
16. Khoroshavin V.S. Structural synthesis of control devices of optimal systems. Kirov: Vyatka State University, 2020:132. (In Russ)
17. Oleynikov V.A., Zotov N.S., Prishvin A.M. Fundamentals of optimal and extreme control: Textbook (approved by the USSR Ministry of Defense). Moscow: Higher School, 1969:296. (In Russ)
18. Kim D.P. Theory of automatic control. V.1. Linear systems 2nd ed., corrected. and add. M.: FIZMATLIT, 2016:312. (In Russ)
19. Curves on a plane: a tutorial. N.F. Popelysheva, T.V. Vasil'kina, V.V. Afonin. – Saransk: Publishing house of Mordov. University, 2014: 256. (In Russ)
20. The World of Mathematics: in 40 volumes. Volume 29: Josep Sales, Francesc Banyule. Mysterious Curves. Ellipses, Hyperbolas, and Other Mathematical Wonders. *Translated from Spanish*. – Moscow: De Agostini, 2014:160. (In Russ)
21. Aleksandrov E.E. Programming in C in Microsoft Visual Studio 2010: tutorial. E.E. Aleksandrov, V.V. Afonin. – Saransk: Publishing house of Mordov. University, 2010: 424. (In Russ)
22. Zaitsev V.F. Ordinary Differential Equations. In 2 parts. Part 1: Handbook for Universities. V.F. Zaitsev, A.D. Polyanik. – 2nd ed., corrected. and additional. Moscow: Yurait Publishing House, 2024:385 (In Russ)
23. Sukhinin B.V., Surkov V.V. Analytical design of robust, speed-optimal control systems with an infinitely large gain. *Mechatronics, automation, control.* 2020;21(8):453-463. DOI:10.17587/mau.21.453-463 (In Russ)
24. Methods of Optimization of Aircraft Control: a textbook / Soloviev V.A., Betanov V.V., Koryanov V.V.; ed. Soloviev V.A.; Bauman Moscow State Technical University (National Research University). Moscow: Publishing house of Bauman Moscow State Technical University, 2022: 194 (In Russ)

Сведение об авторе:

Афонин Виктор Васильевич, кандидат технических наук, доцент; доцент кафедры автоматизированных систем обработки информации и управления; vvafonin53@yandex.ru.

Information about author:

Viktor V. Afonin, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Assoc. Prof., Department of Automated Information Processing Systems and Management; vvafonin53@yandex.ru.

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 08.08.2024.

Одобрена после/рецензирования Revised 30.09.2024.

Принята в печать/ Accepted for publication 17.01.2025.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 004.056

DOI: 10.21822/2073-6185-2025-52-1-57-66



Обзорная статья/ Review article

К вопросу об усовершенствовании систем безопасности критически важных объектов, как объектов критической информационной инфраструктуры

А.А. Гавришев

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
115409, г. Москва, Каширское шоссе, д. 31, Россия,
Московский государственный лингвистический университет»,
119034, г. Москва, Остоженка 38, стр. 1, Россия

Резюме. Цель. Целью данной статьи является выявление путей усовершенствования систем безопасности (СБ) критически важных объектов (КВО), подпадающих под регулирование законодательства о критической информационной инфраструктуре (КИИ).

Метод. Использованы методы защиты информации и информационной безопасности, анализа и обобщения отдельных положений нормативно-правовых документов по обеспечению ИБ объектов КИИ, результаты научно-исследовательских работ по тематике исследования, представленные в РИНЦ, РГБ, ФИПС. Общей методологической основой является системный подход. **Результат.** Проведен обзор требований нормативно-правовых документов по обеспечению безопасности СБ КВО, как объектов КИИ, показавший, что необходим анализ сложившейся практики обеспечения их безопасности. Проведен обзор методов обеспечения безопасности радиоканальных СБ КВО, присутствующих на рынке России. В качестве примера рассматривались широко используемые радиоканальные системы охранной сигнализации (СОС). Выявлены противоречия между отдельными положениями нормативно-правовых документов по обеспечению безопасности объектов КИИ и сложившейся практикой применения радиоканальных СБ КВО, которые возможно отнести к объектам КИИ. С учетом введенных упрощений, предложены возможные пути усовершенствования СБ КВО, которые могут быть отнесены к незначимым объектам КИИ, в частности радиоканальные СОС. **Вывод.** Проведенные исследования позволили выявить пути усовершенствования радиоканальных СБ КВО, как объектов КИИ, в области обеспечения их ИБ.

Ключевые слова: критически важные объекты, критическая информационная инфраструктура, системы безопасности, информационная безопасность, усовершенствование

Для цитирования: А.А. Гавришев. К вопросу об усовершенствовании систем безопасности критически важных объектов, как объектов критической информационной инфраструктуры. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025; 52(1):57-66. DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-1-57-66.

On the issue of improving the security systems of critical facilities as objects of critical information infrastructure

A.A. Gavrishev

National Research Nuclear University MEPhI,
31 Kashirskoe highway, Moscow 115409, Russia,
Moscow State Linguistic University,
38 Ostozhenka St., build. 1, Moscow 119034, Russia

Abstract. Objective. The purpose of this article is to identify ways to improve the security systems (SS) of critical facilities (CF) that are subject to the regulation of legislation on critical information infrastructure (CII). **Method.** The methods used were information protection and information security, analysis and generalization of individual provisions of regulatory docu-

ments on ensuring the information security of critical information infrastructure facilities, the results of research work on the subject of the study, presented in the Russian Science Citation Index, Russian State Library, and Federal Institute of Industrial Property. The general methodological basis is a systematic approach. **Result.** A review of the requirements of regulatory and legal documents on ensuring the safety of the SS of CF, as objects of CII, has been conducted, which showed that an analysis of the established practice of ensuring their safety is necessary. A review of the methods of ensuring the safety of radio-channel SS present in the Russian market is carried out. Widely used radio channel security alarm systems (SAS) are considered. Contradictions have been revealed between certain provisions of regulatory legal documents on ensuring the safety of CII and the established practice of using radio-channel SS, which can be attributed to CII. Ways to improve the security system of critical information systems, which can be classified as insignificant critical information infrastructure objects, in particular radio channels alarm systems. **Conclusion.** The conducted research allowed us to identify ways to improve the radio-channel SS of the CF, as objects of CII, in the field of ensuring their IS.

Keywords: critical facilities, critical information infrastructure, security systems, information security, improvement.

For citation: A.A. Gavrishev. On the issue of improving the security systems of critical facilities as objects of critical information infrastructure. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2025; 52(1):57-66. (In Russ) DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-1-57-66

Введение. Тенденции последнего времени показывают, что вопросам обеспечения безопасности критически важных объектов (КВО) стало уделяться повышенное внимание. Статистические данные показывают [1], что КВО в мире и в России становятся объектом сравнительно небольшого числа различных, в том числе и террористических, атак (при мерно 10 % от общего числа). Однако последствия этих атак могут быть очень серьезными. В указанных условиях, для обеспечения устойчивого функционирования КВО при проведении в отношении них различных атак, на таких объектах должны быть созданы системы безопасности (СБ) различного назначения, призванные обеспечить безопасность персонала КВО, противодействовать террористическим и криминальным угрозам и т.д. Такие системы обычно включают в себя следующие широко распространённые системы: системы охранной сигнализации (СОС), системы контроля и управления доступа (СКУД), системы охранного телевидения (СОТ) и некоторые другие. Указанные системы обычно являются составными частями общей физической защиты КВО [2-5], поэтому они играют большую роль в обеспечении безопасности КВО. Вместе с тем, в условиях непрерывной информатизации всех сфер хозяйственной деятельности человека, такие процессы не проходят бесследно, как для КВО в целом, так и для СБ в частности. Так в настоящее время на КВО зачастую для обеспечения передачи данных в различных системах, напри мер [3-6], в системах охраны периметра или системах контроля доступа, применяются системы радиосвязи.

С учетом сказанного и источников [2-5], заключим, что современные СБ представляют собой сложные программно-аппаратные комплексы и по своей сути являются объектами информатизации. Согласно ГОСТ Р 51275-2006 «Защита информации. Объект информатизации. Факторы, воздействующие на информацию. Общие положения», под такими объектами обычно подразумевается совокупность информационных ресурсов, средств и систем обработки информации, используемых в соответствии с заданной информационной технологией, а также средств их обеспечения, помещений или объектов, в которых эти средства и системы установлены. Несомненно, что СБ так же к ним относятся. Исходя из этого, возможно заключить, что КВО имеют в своем составе, помимо многочисленных информационных систем, автоматизированных систем управления и прочих, отвечающих за управление специфическими технологическими процессами

объекта, так же и многочисленные системы, выполняющие важные вспомогательные функции, связанные с обеспечением безопасности, в частности СБ [5, 7].

Вместе с тем, в последние годы, в условиях информатизации, на первое место вышла проблема обеспечения информационной безопасности (ИБ) многочисленных информационных систем, автоматизированных систем управления и прочих, отвечающих за управление специфическими технологическими процессами, входящих в состав КВО, как объектов критической информационной инфраструктуры (КИИ) [7, 8].

Однако до настоящего времени обеспечение ИБ самих СБ КВО, как объектов информатизации, не рассматривалось широко в литературе, что может негативно сказаться на функционировании КВО при проведении против них различных атак. Один из важных шагов в указанном направлении был сделан в начале 2024 года [9], когда отдельные СБ КВО были отнесены к объектам КИИ, в частности СОС, СКУД и некоторые другие. Поэтому исследования обеспечения ИБ СБ КВО является актуальным направлением исследований и требует дальнейшей проработки.

Постановка задачи. Целью исследования является определение путей усовершенствования СБ КВО, подпадающих под регулирование законодательства о КИИ.

Задачей исследования является выявление противоречий между требованиями нормативно-правовых документов по обеспечению безопасности объектов КИИ и сложившейся практикой применения СБ КВО, которые возможно отнести к объектам КИИ.

Методы исследования. В начале 2024 года ситуация по обеспечению ИБ самих СБ КВО значительно изменилась, так как уполномоченные Федеральные органы исполнительной власти, по согласованию со ФСТЭК РФ, начали утверждать перечни типовых объектов КИИ, функционирующих в соответствующих сферах, подпадающих по регулирование законодательством о КИИ. Так Минпромторгом РФ был утвержден перечень типовых объектов КИИ РФ, функционирующих, например, в области химической промышленности [9]. В соответствии с принятыми нормативными документами к объектам КИИ впервые стали относиться системы безопасности КВО, в частности СОС и СКУД и некоторые другие. Фрагмент соответствующей таблицы приведен ниже (табл. 1).

Таблица 1. Пример систем безопасности КВО, отнесённые к объектам КИИ
Table 1. An example of the security systems of the CIO, related to the objects of the CI

№	Название типового объекта КИИ Name of a typical critical information infrastructure object	Осуществляемые критические процессы Critical processes being carried out
1.	СОС	Обнаружение проникновения и подача сигналов оповещения и извещения о проникновениях Detection of intrusion and provision of intrusion warning and notification signals
2.	СКУД	Управление доступом на территорию Access control to the territory

Как пояснили в Минпромторге РФ, информационные системы и автоматизированные системы управления из таких перечней – это основа для процедуры категорирования объектов КИИ в этих отраслях. Известно [8, 10], что основными мероприятия в рамках реализации обеспечения безопасности объектов КИИ являются следующие:

1. Категорирование объектов КИИ, в рамках реализации которого выделяются значимые объекты КИИ;
2. Выполнение требований по обеспечению безопасности объектов КИИ в зависимости от их категории значимости;
3. Информирование уполномоченных государственных органов о компьютерных инцидентах на объектах КИИ, произошедших, в том числе, и в результате компьютерных атак, и реагирование на них.

Из отдельных положений нормативно-правовых документов известно [8, 10], что в результате процесса категорирования объекту КИИ может быть установлена одна

из трех категорий значимости. Тогда он называется значимым объектом КИИ (ЗОКИИ). Либо, если объект КИИ не соответствует критериям значимости, ему не присваивается ни одна из таких категорий и такой объект называется незначимым объектом КИИ (НОКИИ). Организации, которым принадлежат, как ЗОКИИ, так и НОКИИ, обязаны соблюдать требования по обеспечению безопасности таких объектов КИИ, установленные соответствующим законодательством [11-13]. При этом требования по обеспечению безопасности объектов КИИ зависят от их категории значимости – чем выше категория значимости объекта КИИ, тем более строгие требования по обеспечению безопасности выдвигаются для них. Таким образом, в случае если СОС, СКУД и другие СБ, входящие в состав КВО, признаны ЗОКИИ или НОКИИ, то на них распространяются соответствующие требования законодательства. Исходя из этого, возникает ряд сложностей при обеспечении безопасности СОС, СКУД и других СБ, входящих в состав КВО, как объектов КИИ.

В связи с большой трудоемкостью процесса обеспечения безопасности объектов КИИ, в первую очередь значимых, далее рассмотрим упрощенный сценарий, при котором СБ КВО не будет присваиваться ни одна из категорий значимости, и они будут НОКИИ. При реализации указанного сценария, не вдаваясь в подробности самого процесса категорирования, необходимо выполнять ряд обязательных требований, установленных законодательством о КИИ для НОКИИ [11-13]. Их условно возможно разделить на организационно-правовые и технические.

Организационно-правовые меры обеспечения безопасности НОКИИ, описанные в соответствующих нормативно-правовых документах, например, назначение заместителя руководителя, ответственного за обеспечение ИБ в организации; организационные меры по обнаружению, предупреждению и ликвидации последствий компьютерных атак и реагированию на компьютерные инциденты на таких объектах и другие, в целом не вызывают затруднений при их внедрении. При этом обязательные технические мероприятия по обеспечению безопасности НОКИИ в текущем законодательстве не определены и, согласно нормативно-правовым документам, могут определяться собственником НОКИИ самостоятельно, с учетом текущего законодательства. Вместе с тем, возможно предположить, что обнаружение, предупреждение и ликвидация последствий компьютерных атак и реагирование на компьютерные инциденты на объектах КИИ, как одно из важных направлений обеспечения их безопасности, потребует наличия у организации, которая ими владеет, программных, программно-аппаратных и иных средств, с помощью которых возможно выполнить указанные функции.

Согласно ГОСТ Р 59709-2022 «Защита информации. Управление компьютерными инцидентами. Термины и определения», известно, что под такими средствами понимаются технические, программные, программно-аппаратные и иные средства для обнаружения, предупреждения и ликвидации последствий компьютерных атак, а также технические, программные, программно-аппаратные и иные средства поиска признаков компьютерных атак (СППКА) в сетях электросвязи и средства обмена информацией, для которых имеется документальное подтверждение соответствия требованиям, установленным в нормативных правовых актах и методических документах. Более их подробное описание приведено в ГОСТ Р 59709-2022 «Защита информации. Управление компьютерными инцидентами. Термины и определения». В целом возможно заключить, что средства для обнаружения, предупреждения и ликвидации последствий компьютерных атак представляют собой обширный класс технических, программных и программно-аппаратных средств, призванных выполнять возложенные на них функции, с учетом нормативных ограничений законодательства. В силу своей многочисленности и обширности в отдельной статье не представляется возможным полностью охватить всю указанную область. Поэтому далее остановимся на СППКА в сетях электросвязи. СППКА в сетях электросвязи – это средства, предназначенные для обнаружения в сетях электросвязи, используемых для организации взаимодействия информационных ресурсов, признаков компьютерных атак по значениям

служебных полей протоколов сетевого взаимодействия, а также осуществления сбора, накопления и статистической обработки результатов такого обнаружения.

Согласно ГОСТ Р 53111-2008 «Устойчивость функционирования сети электросвязи. Требования и методы проверки», электросвязь – это любые излучения, передача или прием знаков, сигналов, голосовой информации, письменного текста, изображений, звуков или сообщений любого рода по радиосистеме, проводной, оптической и другим электромагнитным системам. Таким образом, в СБ КВО, отнесенных к НОКИИ, одним из самых важных мест является используемая система передача данных, независимо от того проводная она или нет. Вместе с тем, приведенные выше данные о внедрении систем радиосвязи в СБ, например в СОС, а также различные исследования показывают [3, 14-18], что для эффективного контроля больших территорий перспективным направлением является использованием радиоканальных СОС, обеспечивающих сбор информации с распределенных по территории объекта датчиков с радиоизвещением.

Датчики в данном случае располагаются по всей территории охраняемого объекта таким образом, чтобы расстояние между ними не превышало радиуса действия датчика, при котором обеспечивается обнаружение постороннего объекта и не образуются так называемые мертвые зоны. При попадании в зону действия датчика человека или постороннего предмета датчик фиксирует факт возникновения внештатной ситуации и посыпает по радиоканалу на пульт управления системой сигнал тревоги. При этом передаваемые сигналы таких систем обеспечивают пространственную электромагнитную доступность, создающую благоприятные условия для реализации злоумышленниками различных угроз безопасности с помощью технических средств радиоразведки [3, 5, 14-18]. При этом, статистические данные, представленные НИЦ «Охрана» Росгвардии РФ [17], показывают, что около половины случаев нарушения работоспособности СБ КВО приходится на их каналы связи, в первую очередь беспроводные, и одними из основных преднамеренных угроз безопасности являются подмена передаваемых данных и постановка помех. Указанные факты, в условиях необходимости поиска признаков компьютерных атак в сетях электросвязи, ставят вопросы об углубленных исследованиях СБ КВО, отнесенных к объектам КИИ. Исходя из этого возникает задача анализа сложившейся практики обеспечения безопасности СБ КВО, которые возможно отнести к объектам КИИ.

Обсуждение результатов. Проведем обзор методов обеспечения безопасности радиоканальных СБ КВО, присутствующих на рынке России. Для дальнейших исследований будем рассматривать область защиты данных, передаваемых в радиоканальных СОС. Для этого обратимся к источникам [14-16, 19-23], в которых проанализированы некоторые широко используемые радиоканальные СОС.

В табл. 2 приведены характеристики некоторых из них. Как видно из табл. 2, в целом в радиоканальных СОС, присутствующих на рынке России, используются отдельные элементы защиты данных, передаваемых в радиоканале. При этом следует обратить внимание на следующие аспекты их применения:

- 1) Для работы с достаточно сложным оборудованием в области обеспечения ИБ необходимо наличие квалифицированного персонала с соответствующим опытом работы;
- 2) Ситуация, в рамках которой многие производители СБ используют сигналы с одним и тем же видом манипуляцией при передаче информации по радиоканалу [14, 19, 20, 23], является потенциальной уязвимостью и поэтому существует потребность в расширении арсенала используемых средств построения сигнально-кодовых конструкций;
- 3) Методы защиты передаваемой информации в радиоканальных СОС в целом возможно разделить на криптографические средства защиты информации, применяемые чаще всего, и технологии на основе шумоподобных сигналов, применяемые значительно реже [5, 14-18, 23];
- 4) Во многих радиоканальных СОС не указан прямо, какой алгоритм шифрования применяется, либо используются иностранные алгоритмы шифрования;

5) Многие радиоканальные СОС в целом не могут противостоять угрозам перехвата передаваемых данных и преднамеренного подавления их помехами в силу использования систем связи с простыми сигналами.

Таблица 2. Характеристики некоторых широко используемых радиоканальных СОС

Table 2. Characteristics of some widely used radio channel SAS

Название Name	Диапазон рабочих частот, МГц Operating frequen- cy range	Вид модуляции Modulation type	Использование шифрования Using encryption	Использование шумоподобных сигналов Using noise-like signals
Стрелец-Аргон Sagittarius-Argon	146 – 174, 403 – 470	ЧМ	Да (алгоритм не указан) Yes (algorithm not specified)	Нет No
Базальт Basalt	450 – 453, 460 – 463	ЧМ	Да (алгоритм не указан) Yes (algorithm not specified)	ППРЧ
Приток-А-Р Pritok-A-R	136 – 174, 430 – 470	ЧМ	AES128	Нет No
Протон Proton	146 – 174, 403 – 470	ЧМ	Элементы криптозащиты Elements of cryptographic protection	Прямое расширение спектра с помощью кодов Баркера Direct Spread Spectrum with Barker Codes
Радиосеть Radio Network	450 – 453, 460 – 463	ЧМ	Элементы криптозащиты Elements of cryptographic protection	Нет No
Гермес Hermes	146 – 174	ЧМ	Элементы криптозащиты Elements of cryptographic protection	ППРЧ
Астра-Зитадель Astra-Zitadel	2400 – 2480	Квадратур- ная ФМ Quadrature FM	Да (алгоритм не указан) Yes (algorithm not specified)	Прямое расширение спектра Direct Spread Spectrum

Таким образом, в целом следует признать, что современные радиоканальные СОС не в полной мере обеспечивают защиту передаваемых данных от известных угроз безопасности, например, перехвата передаваемого сигнала, его подмены или подавления помехами [14-18, 23]. Обзор нормативно-правовых требований по обеспечению безопасности самих СБ, как объектов КИИ, и методов обеспечения безопасности радиоканальных СБ, присутствующих на рынке России, показывает, что между ними существуют некоторые противоречия, в частности:

1. Средства поиска признаков компьютерных атак в сетях электросвязи для радиоканальных СБ в настоящий момент пока еще широко не описаны в литературе по таким системам;
2. Отсутствуют требования по обеспечению конфиденциальности, целостности и доступности передаваемых данных в радиоканале СБ;
3. Использование иностранных алгоритмов шифрования для обеспечения безопасности передачи данных в СБ КВО, как объектах КИИ, вступает в противоречие с требованиями законодательства об использовании отечественных алгоритмов шифрования [24];
4. Одним из регуляторов в области законодательного и технического регулирования для СБ в России является Росгвардия России, однако до настоящего времени ее роль для таких систем, отнесенных к КИИ, нормативно не урегулирована.

В связи с вышеизложенным, с учетом описанных замечаний и работ [3, 5, 14-23], выявлены следующие возможные пути усовершенствования СБ КВО, которые могут быть отнесены к незначимым объектам КИИ, в частности радиоканальные СОС:

1. Руководящие документы по обеспечению безопасности объектов КИИ, в качестве которых выступают различные радиоканальные системы, в частности СБ, целесообразно дополнить следующими угрозами безопасности: перехват передаваемых сигналов, подмена передаваемых сигналов и подавление их помехами;
2. Анализ различных источников [5, 14-23, 25, 26] показывает, что в качестве мер, направленных на поиск признаков компьютерных атак в сетях электросвязи, представленных радиосистемами, для СБ в настоящее время возможно использовать элементы криптографической защиты информации (электронная подпись, хэш-функции, имитовставки), технологии на основе шумоподобных сигналов, интеллектуальные методы поиска атак, аппарат нечёткой логики, аппарат сетей Петри и некоторые другие;
3. Для одновременного обеспечения конфиденциальности, целостности и доступности передаваемых данных в СБ КВО, необходимо применять технологии на основе шумоподобных сигналов, либо сочетание криптографических средств защиты информации и технологий на основе шумоподобных сигналов [3, 5, 14-19, 23];
4. Для обеспечения безопасности СБ КВО, как объектов КИИ, необходимо в обязательном порядке, при соблюдении установленных законодательством правил и процедур, использовать сертифицированные средства защиты информации из числа рекомендованных ФСБ РФ и ФСТЭК РФ [5, 14, 15, 24];
5. В соответствии с действующими нормативными требованиями [11], в СБ КВО, отнесенных к НОКИИ, запрещается использовать, за исключением оговоренных случаев, программные, программно-аппаратные и иные средства поиска признаков компьютерных атак в сетях электросвязи и защиты информации, странами происхождения которых являются, совершающие в отношении России недружественные действия. Исходя из этого, производителям СБ и их эксплуатантам, в случае отнесения таких объектов к КИИ, необходимо перейти на отечественные программные, программно-аппаратные и иные средства поиска признаков компьютерных атак в сетях электросвязи и защиты информации, либо произведенные в дружественных странах;
6. Целесообразно уточнить область технического регулирования СБ, отнесенных к КИИ.

Вывод. В данной статье приведены результаты исследования вопросов обеспечения ИБ систем безопасности КВО, как объектов КИИ.

Проведен обзор нормативно-правовых требований по обеспечению безопасности самих СБ КВО, как объектов КИИ, показавший, что необходим анализ сложившейся практики обеспечения безопасности СБ КВО, которые возможно отнести к объектам КИИ. Проведен обзор методов обеспечения безопасности радиоканальных СБ КВО, присутствующих на рынке России.

В качестве примера рассматривались широко используемые радиоканальные СОС. Показано, что современные радиоканальные СОС, как один из видов СБ, не в полной мере обеспечивают защиту передаваемых данных от известных угроз безопасности, например, перехвата передаваемого сигнала, его подмены или подавления помехами.

Выявлены противоречия между требованиями нормативно-правовых документов по обеспечению безопасности объектов КИИ и сложившейся практикой применения СБ КВО, которые возможно отнести к объектам КИИ.

С учетом введенных упрощений, предложены возможные пути усовершенствования СБ КВО, которые могут быть отнесены к незначимым объектам КИИ, в частности радиоканальные СОС.

Библиографический список:

1. Степанова, Е. Терроризм как угроза критической инфраструктуре / Е. Степанова // Свободная мысль. – 2010. – № 4. – С. 35-48.

2. Lawrence, Fennelly Effective Physical Security / Lawrence Fennelly. 2013. 4th Edition. Butterworth-Heinemann. – 366 P.
3. Кузьмина, Н.А. Системы фиксации и распознавания несанкционированного проникновения в охраняемую зону как элемент эффективной безопасности объекта транспортной инфраструктуры / Н.А. Кузьмина // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2018. – Т. 12. – № 5. – С. 47-52. DOI: 10.24411/2072-8735-2018-10086
4. Волхонский, В.В. Особенности разработки структуры средств обнаружения угроз охраняемому объекту / В.В. Волхонский, А.Г. Крупнов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2011. – № 4. – С. 131-136.
5. Бондарев, П.В. Физическая защита ядерных объектов / П.В. Бондарев, А.В. Измайлов, А.И. Толстой. М.: МИФИ, 2008. – 584 с.
6. Руднев, А.Н. Анализ беспроводных сетей, использующихся при выполнении работ с радиационным фактором / А.Н. Руднев, Р.А. Рязанов // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2011. – № 10. – С. 81-82.
7. Костин, В.Н. Методики, модели и методы обоснования и разработки систем физической защиты критически важных объектов: автореф. дис. на соиск. ученой степ. д-ра техн. наук. / В.Н. Костин Оренбург: Оренбургский гос. ун-т, 2021. – 38 с.
8. Федеральный закон от 26.07.2017 № 187-ФЗ «О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации».
9. Минпромторг утвердил перечни типовых объектов КИИ в металлургии, горнодобывающей промышленности и ОПК. URL: <https://ru-bezh.ru/zakonodatelstvo-i-normativyi/news/24/01/29/minpromtorg-utverdil-perechni-tipovuyh-obektov-kiii-v-metallurgii> (дата обращения: 25.01.2024).
10. Постановление Правительства РФ от 08.02.2018 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»
11. Указ Президента РФ от 01.05.2022 № 250 «О дополнительных мерах по обеспечению информационной безопасности Российской Федерации».
12. Приказ ФСТЭК РФ от 25.12.2017 г. № 239 «Об утверждении Требований по обеспечению безопасности значимых объектов критической информационной инфраструктуры Российской Федерации».
13. Приказ ФСБ России от 19.06.2019 г. № 282 «Об утверждении Порядка информирования ФСБ России о компьютерных инцидентах, реагирования на них, принятия мер по ликвидации последствий компьютерных атак, проведенных в отношении значимых объектов критической информационной инфраструктуры Российской Федерации».
14. Гавришев, А.А. Анализ технологий защиты радиоканала охранно-пожарных сигнализаций от несанкционированного доступа / А.А. Гавришев, А.П. Жук, Д.Л. Осипов // Труды СПИИРАН. – 2016. – Вып. 4(47). – С. 28-45. DOI: 10.15622/sp.47.2
15. Брауде-Золотарев, Ю. Алгоритмы безопасности радиоканалов / Ю. Брауде-Золотарев // Алгоритм безопасности. – 2013. – № 1. – С. 64-66.
16. Мальцев, Г.Н. Исследование защищенности системы командного радиоуправления подвижным объектом с использованием марковской модели преодоления нарушителем многоуровневой системы защиты информации / Г.Н. Мальцев, С.А. Матвеев // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2021. – № 677. – С. 153-163.
17. Членов, А.Н. Анализ способов нейтрализации тревожной сигнализации систем охраны категорированных объектов / А.Н. Членов, Н.А. Рябцев, А.Н. Федин // Технологии техносферной безопасности. – 2017. – № 3. – С. 271-279.
18. Гавришев, А.А. Повышение защищенности беспроводных систем безопасности: аналитический обзор публикаций / А.А. Гавришев // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Информационные технологии. – 2017. – Т. 15. – № 1. – С. 5-14.
19. Рекомендации «Применение оборудования радиоканальных систем передачи извещений (РСПИ)» Р 78.36.048. М.: НИЦ «Охрана», 2015. 182 с.
20. Список технических средств безопасности, удовлетворяющих «Единым требованиям к системам передачи извещений, объектовым техническим средствам охраны и охранным сигнально-противоугонным устройствам автотранспортных средств, предназначенным для применения в подразделениях вневедомственной охраны войск национальной гвардии Российской Федерации». URL: <http://nicohrana.ru/237-spisok-tehnicheskikh-sredstv-bezopasnosti.html> (дата обращения: 01.02.2024).
21. Каталог продукции НПК «Дедал» URL: <https://www.dedal.ru/include/catalog.pdf> (дата обращения: 01.02.2024).
22. Реализация требований СП484.1311500.2020 (далее СП484) в приборах Астра серии Pro. URL: <https://www.tinko.ru/catalog/download.php?file=185600B0DE45090CA6F364035140DDED.pdf&prodid=1798> (дата обращения: 01.02.2024)

23. Гавришев, А.А. Использование широкополосных методов организации радиосвязи DSSS, FHSS и OFDM в радиоканальных системах охранно-пожарной сигнализации, присутствующих на рынке / А.А. Гавришев // Гражданская оборона на страже мира и безопасности: Материалы V Международной научно-практической конференции, посвященной Всемирному дню гражданской обороны. В 4-х частях, Москва, 01 марта 2021 года. Ч. III. М.: АГПС МЧС России, 2021. – С. 24-27.
24. Постановление Правительства РФ от 16.04.2012 № 313 «Об утверждении Положения о лицензировании деятельности по разработке, производству, распространению шифровальных (криптографических) средств, информационных систем и телекоммуникационных систем, защищенных с использованием шифровальных (криптографических) средств, выполнению работ, оказанию услуг в области шифрования информации, техническому обслуживанию шифровальных (криптографических) средств, информационных систем и телекоммуникационных систем, защищенных с использованием шифровальных (криптографических) средств (за исключением случая, если техническое обслуживание шифровальных (криптографических) средств, информационных систем и телекоммуникационных систем, защищенных с использованием шифровальных (криптографических) средств, осуществляется для обеспечения собственных нужд юридического лица или индивидуального предпринимателя)»
25. Васильев, В.И. Интеллектуальная система обнаружения атак в локальных беспроводных сетях / В.И. Васильев, И.В. Шарабыров // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2015. № 4. С. 95-105.
26. Лесняк, Д.А. Моделирование комплекса средств защиты информации радиоканалов временными раскрашенными сетями Петри / Д.А. Лесняк, С.А. Матвеев // СПбНТОРЭС. – 2020. – № 1(75). – С. 127-130.

References:

1. Stepanova E. Terrorism as a threat to critical infrastructure. *Svobodnaja mysl'* 2010; 4: 35-48 (In Russ.).
2. Lawrence Fennelly Effective Physical Security. 4th Edition. *Butterworth-Heinemann*. 2013:366
3. Kuzmina N.A. Fixing systems and recognition of unauthorized penetration in the protected zone as an element of effective safety of the transport infrastructure object. *T-Comm.* 2018;5:7-52. DOI: 10.24411/2072-8735-2018-10086 (In Russ.).
4. Volhonskij V.V., Krupnov A.G. Features of the development of the structure of threat detection tools for a protected object. *Nauchno-tehnicheskij vestnik informacionnyh tehnologij, mehaniki i optiki.* 2011; 4: 131-136 (In Russ.).
5. Bondarev P.V., Izmajlov A.V., Tolstoj A.I. Physical protection of nuclear facilities. Moscow: *MIFI Publ.*, 2008: 584. (In Russ.).
6. Rudnev A.N., Rjazanov R.A. Analysis of wireless networks used in the performance of work with the radiation factor. *T-Comm.* 2011; 10: 81-82 (In Russ.).
7. Kostin V.N. Methods, models and methods of substantiation and development of physical protection systems for critical facilities: abstract of the dissertation of the Doctor of Technical Sciences. Orenburg: Orenburgskij gos. un-t, 2021:38. (In Russ.).
8. Federal Law No. 187-FZ dated 26.07.2017 «On the Security of the Critical Information Infrastructure of the Russian Federation» (In Russ.).
9. Ministry of Industry and Trade has approved lists of typical CII facilities in metallurgy, mining and defense industry. URL: <https://ru-bezh.ru/zakonodatelstvo-i-normativyi/news/24/01/29/minpromtorg-utverdil-perechni-tipovyh-obektov-kii-v-metallurgii> (date of access: 25.01.2024). (In Russ.)
10. Decree of the Government of the Russian Federation dated 08.02.2018 No. 127 «On Approval of the Rules for Categorizing objects of critical Information Infrastructure of the Russian Federation, as well as a list of indicators of criteria for the significance of objects of critical information infrastructure of the Russian Federation and their values» (In Russ.)
11. Decree of the President of the Russian Federation dated 01.05.2022 No. 250 «On additional measures to ensure information security of the Russian Federation» (In Russ.)
12. FSTEC RF Order No. 239 dated 25.12.2017 «On Approval of Requirements for Ensuring the Security of Significant objects of the Critical information Infrastructure of the Russian Federation» (In Russ.)
13. Order of the FSB of Russia dated 19.06.2019 No. 282 «On Approval of the Procedure for Informing the FSB of Russia about Computer Incidents, Responding to Them, and Taking Measures to Eliminate the consequences of computer attacks carried out against Significant objects of the Critical Information Infrastructure of the Russian Federation» (In Russ.)
14. Gavrishev A.A., Zhuk A.P., Osipov D.L. Analysis of protection technologies radio fire alarm systems against unauthorized access. *SPIRAS Proceedings.* 2016;I(4): 28-45. DOI: 10.15622/sp.47.2 (In Russ.).
15. Braude-Zolotarev Yu. Safety radio's algorithms. *Algoritm bezopasnosti . Safety algorithm.* 2013;1:64-66 (In Russ.).

16. Mal'cev G.N., Matveev S.A. Investigation of the security of the command radio control system of a mobile object using the Markov model of overcoming a multi-level information protection system by an intruder. *Trudy Voenno-kosmicheskoy akademii imeni A.F. Mozhaiskogo*. 2021;677:153-163. (In Russ.).
17. Chlenov A.N., Ryabtsev N.A., Fedin A.N. Analysis of methods of neutralizing alarm protection systems categorized objects. *Technology of technosphere safety*. 2017; 3: 271-279 (In Russ.).
18. Gavrishev A.A. Analytical Review of Publications Covering the Theme of «Improving the Protection of Wireless Security Systems». *Vestnik NSU. Series: Information Technologies*. 2017; 1: 5-14. (In Russ.).
19. Recommendations «Application of equipment for radio channel notification transmission systems» R 78.36.048. Moscow: NIC «Ohrana» Publ., 2015;182. (In Russ.)
20. The list of technical security equipment that meets the «Uniform requirements for notification transmission systems, object technical security equipment and alarm anti-theft devices of motor vehicles intended for use in non-departmental security units of the National Guard of the Russian Federation». URL: <http://nicohrana.ru/237-spisok-tehnicheskikh-sredstv-bezopasnosti.html> (date of access: 01.02.2024). (In Russ.)
21. Product catalog of NPK «Daedalus». URL: <https://www.dedal.ru/include/catalog.pdf> (date of access: 01.02.2024). (In Russ.)
22. <https://www.tinko.ru/catalog/download.php?file=185600B0DE45090CA6F364035140DDED.pdf&prodid=1798> (date of access: 01.02.2024) Implementation of the requirements of SP484.1311500.2020 (hereinafter SP484) in Astra Pro series devices. (In Russ.)
23. Gavrishev A.A. The use of broadband methods of organizing radio communication DSSS, FHSS and OFDM in radio channel of fire alarm systems present on the market. Civil Defense on guard of peace and security. Proceedings of the V International Scientific and Practical Conference dedicated to the World Civil Defense Day. Vol. III. Moscow: *Academy of the SFS of the Ministry of Emergency Situations of Russia*, 2021; 24-27. (In Russ.).
24. Decree of the Government of the Russian Federation dated 16.04.2012 No. 313 «On Approval of the Regulations on Licensing Activities for the Development, Production, Distribution of Encryption (cryptographic) tools, information systems and Telecommunications Systems Protected using encryption (cryptographic) tools, performance of works, provision of services in the field of information encryption, maintenance of encryption (cryptographic) tools, information systems and telecommunication systems protected using encryption (cryptographic) means (except in the case of, if the maintenance of encryption (cryptographic) means, information systems and telecommunication systems protected using encryption (cryptographic) means is carried out to meet the own needs of a legal entity or an individual entrepreneur)». (In Russ.)
25. Vasilev V.I., Sharabyrov I.V. Intelligent intrusion detection system in local wireless networks. *Vestnik UGATU*. 2015; 4: 95-105 (In Russ.).
26. Lesnyak D.A., Matveev S.A. Modeling of the complex of information protection means of radio channels with temporary colored Petri nets. *SPbNTORES*. 2020;1:127-130 (In Russ.).

Сведения об авторе:

Гавришев Алексей Андреевич, кандидат технических наук, доцент; доцент кафедры стратегические информационные исследования; доцент кафедры международной информационной безопасности; alexxx.2008@inbox.ru

Information about author:

Aleksey A. Gavrishev, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Assoc. Prof., Department of Strategic Information Research; Assoc. Prof., Department of International Information Security; alexxx.2008@inbox.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 27.09.2024.

Одобрена после/репензирования Reviced 01.11.2024.

Принята в печать/ Accepted for publication 29.12.2024.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 621.396

DOI: 10.21822/2073-6185-2025-52-1-67-76



Оригинальная статья /Original article

Моделирование рассеивания электромагнитных волн на полых структурах

с эллиптическим поперечным сечением

В.В. Гарбузов¹, А.П. Преображенский²

¹Кадетский корпус (инженерная школа),

Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»,

¹394003, г. Воронеж, ул. Краснознаменная, 153, Россия,

²Воронежский институт высоких технологий,

²394043, г. Воронеж, ул. Ленина, 73А, Россия

Резюме. Целью исследования является решение задачи, направленной на оценку характеристик рассеяния электромагнитных волн на полых структурах, размеры которых относятся к резонансной области. **Метод.** Размеры полых структур, имеющих максимальные характеристики рассеяния, определялись на основе комбинации метода интегральных уравнений и метода оптимизации. Учтено рассеяние на краях апертуры полой структуры. Для определения характеристик течения предлагается использовать уравнение Матье. Приводятся основные этапы алгоритма расчета функций Матье, которые были использованы в ходе реализации компьютерной программы. Применяется равенство Парсеваля для интегрального преобразования. **Результат.** Создана математическая модель и алгоритм численного анализа особенностей рассеяния плоских радиоволн на полых структурах, которые являются компонентами объектов сложной формы, антенно-фидерных линий и антенных устройств. Получены результаты тестовых расчётов. Предложена структура подсистемы анализа полых структур сложной формы. **Вывод.** Получены априорные оценки решения краевой задачи в полосе эллиптических уравнений высшего порядка, вырождающихся к кубическому уравнению по одной из переменных. Показаны условия, при которых априорные оценки могут быть достигнуты, для этого, в том числе, введены дополнительные пространства. Соответствующая задача изучается в весовых пространствах типа С.Л. Соболева. Рассмотрены две теоремы, имеющие отношение к краевой задаче в полосе для одного класса вырождающихся эллиптических уравнений высокого порядка, проведен анализ возможностей получения априорной оценки. Весовые пространства дают априорную оценку решения краевой задачи в полосе для эллиптического уравнения высшего порядка, вырождающегося к кубическому уравнению на одной из границ полосы по одной из переменных.

Ключевые слова: физико-математическое и численное моделирование, дифракция электромагнитных волн, полая структура, интегральное уравнение, эффективная площадь рассеяния

Для цитирования: В.В. Гарбузов, А.П. Преображенский. Моделирование рассеяния электромагнитных волн на полых структурах с эллиптическим поперечным сечением. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025; 52(1):67-76. DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-1-67-76

Simulation of electromagnetic wave scattering on hollow structures with elliptical cross section

V.V. Garbuzov¹, A.P. Preobrazhensky²

¹Cadet Corps (Engineering School), Military Educational and Scientific Center of the Air Force "Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin",

¹153 Krasnoznamenaya St., Voronezh 1394003, Russia,

²Voronezh Institute of High Technologies,

²73A Lenin St., Voronezh 394043, Russia

Abstract. Objective. The aim of the study is to solve a problem aimed at assessing the characteristics of electromagnetic wave scattering on hollow structures whose dimensions belong to the resonant region. **Method.** The dimensions of the hollow structures with maximum scattering characteristics were determined by a combination of the integral equation method and the optimization method. Scattering at the edges of the aperture of the hollow structure is taken into account. It is proposed to use the Mathieu equation to determine the flow characteristics. The stages of the algorithm for calculating the Mathieu functions are given, which were used during the implementation of the computer program. Parseval's equality is used for the integral transformation. **Result.** A mathematical model and an algorithm for numerical analysis of the scattering features of plane radio waves on hollow structures that are components of complex-shaped objects, antenna-feeder lines, and antenna devices have been created. The results of test calculations have been obtained. The structure of the subsystem for analyzing complex-shaped hollow structures has been proposed. **Conclusion.** A priori estimates are obtained for the solution of a boundary value problem in a strip of higher-order elliptic equations degenerating to a cubic equation in one variable. Conditions for achieving a priori estimates are shown; additional spaces are introduced for this purpose. The problem is studied in weighted spaces of the S.L. Sobolev type. Two theorems related to the boundary value problem in a strip for one class of degenerate elliptic equations of high order are considered, and an analysis of the possibilities of obtaining an a priori estimate is carried out. Weighted spaces give an a priori estimate for the solution of a boundary value problem in a strip for a higher-order elliptic equation degenerating to a cubic equation on one of the boundaries of the strip in one of the variables.

Keywords: physical, mathematical and numerical modeling, diffraction of electromagnetic waves, hollow structure, integral equation, effective scattering area

For citation: V.V. Garbuzov, A.P. Preobrazhensky. Simulation of electromagnetic wave scattering on hollow structures with elliptical cross section. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2025;52(1):67-76. (In Russ) DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-1-67-76

Введение. Рассеиватели радиолокационных сигналов и преобразователи энергии электромагнитных волн, как правило, характеризуются большими электрическими размерами, сложной геометрией, наличием поглощающих и нелинейных элементов. Анализ и синтез вышеупомянутых электродинамических объектов на основе грубого представления о протекающих в них физических процессах несет в себе опасность появления существенных и трудно контролируемых погрешностей оценки их основных характеристик, которые, как правило, очень быстро изменяются при изменении частоты, вида поляризации и угла падения ЭМВ. Измерение основных характеристик РЦ в широкой полосе частот и обширном угловом секторе требует наличия либо аттестованного специально оборудованного антенного полигона, либо аттестованной безэховой камеры, а также больших затрат времени и материальных средств. Развитие электродинамических систем автоматизированного проектирования позволяет решать, как совершенно новые задачи в области антенно-фидерной техники, теории дифракции электромагнитных волн на структурах сложной формы, требующие значительных вычислительных затрат, так и практически реализовать многие научные разработки, высокая степень сложности которых тормозила их практическое воплощение.

Постановка задачи. Рассмотрим основные этапы алгоритма расчета рассеянного электромагнитного поля через полую конструкцию эллиптического сечения. Рассмотрим полую структуру эллиптического поперечного сечения с размером полуосей a и b и длиной L (рис. 1). Пусть на апертуру полости падает плоская ЭМВ (множитель $\exp(j\omega t)$ в дальнейшем будем опускать):

$$\vec{E}^i = (\hat{\theta}^i I_\theta + \hat{\phi}^i I_\phi) \exp(jk^i \vec{r}), \quad (1)$$

где $\vec{k}^i = k[(\hat{x} \cos \varphi^i + \hat{y} \sin \varphi^i) \sin \theta^i + \hat{z} \cos \theta^i]$ - волновой вектор падающей волны, $k=2\pi/\lambda$ - волновое число свободного пространства; I_θ , I_ϕ - амплитуды, соответствующие Е- и Н-поляризациям падающей плоской ЭМВ.

Методы исследования. Алгоритм расчета поля рассеяния электромагнитных волн на идеально проводящих полых структурах круглого поперечного сечения сложной формы. На основе модального метода алгоритм расчета эффективной площади рассеяния полой конструкции эллиптического сечения состоит из следующих основных этапов [1]:

1. Тангенциальные составляющие электрического и магнитного поля, возбуждающего падающей плоской ЭМВ (1) на апертуре полости ($z=0$) представляются в виде разложений по модам эллиптического волновода с соответствующими модальными коэффициентами. Заметим, модальные коэффициенты $\{G_{mn}, D_{mn}\}$ относятся к TE-модам (поперечно-электрические волны), а модальные коэффициенты $\{\bar{G}_{mn}, \bar{D}_{mn}\}$ - к TM-модам. Помимо этого, модальные коэффициенты $\{G_{mn}, \bar{G}_{mn}\}$ (рис. 1) соответствуют выходящим (в направлении $+z$) из полости модам, а $\{D_{mn}, \bar{D}_{mn}\}$ соответствуют модам, входящим (в направлении $-z$) в полость.

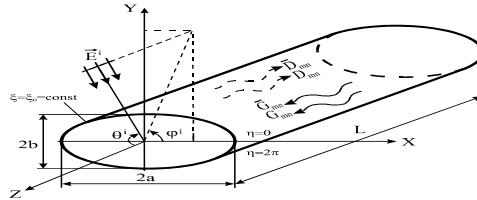


Рис. 1- Рассеяние электромагнитных волн на полой структуре эллиптического поперечного сечения

Fig. 1 - Scattering of electromagnetic waves on a hollow structure of elliptical cross-section

В зависимости от условий возбуждения генерируются поперечные магнитные волны и поперечные радиоволны в эллиптическом поперечном резонаторе. Секции далее делятся на четные и нечетные. Четность или нечетность вала определяют относительно большой оси эллипса поперечного сечения полости. Пусть при изменении знака координаты η эллиптической системы координат близко к нулю (относительно большой оси) продольная составляющая поля E_z, H_z не меняет знака, то волна называется четной, в обратном случае - нечетной. (Координаты ξ и η эллиптической системы координат [2] связаны с координатами x, y прямоугольной системы координат следующими соотношениями: $x = h \chi \xi \cos \eta, y = h \chi \xi \sin \eta$, где h - фокальная полуось.) Тангенциальные составляющие полей на апертуре полости (при $z=0$) выражаются с помощью моды эллиптического волновода в случае четных волн следующим образом:

$$\begin{aligned} \vec{E}_{tan}(z=0^-) = & \bar{\xi} \sum_m \sum_n [(G_{mn} + D_{mn}) \frac{\beta_{mn}}{k^2 \ell_1} C e_m(\xi, {}_c q_{mn}) {}_c C_m(\eta, {}_c q_{mn}) + \\ & + (\bar{G}_{mn} - \bar{D}_{mn}) \frac{\beta_{mn}}{k^2 \ell_1} C e_m(\xi, {}_c q_{mn}) {}_c C_m(\eta, {}_c q_{mn})] + \\ & + \bar{\eta} \sum_m \sum_n [(G_{mn} + D_{mn}) \frac{\beta_{mn}}{k^2 \ell_2} C e_m(\xi, {}_c q_{mn}) {}_c C_m(\eta, {}_c q_{mn}) + \\ & + (\bar{G}_{mn} - \bar{D}_{mn}) \frac{\beta_{mn}}{k^2 \ell_2} C e_m(\xi, {}_c q_{mn}) {}_c C_m(\eta, {}_c q_{mn})], \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \vec{H}_{tan}(z=0^-) = & \bar{\xi} \sum_m \sum_n [(G_{mn} - D_{mn}) \frac{\omega \epsilon_0}{k^2 \ell_1} C e_m(\xi, {}_c q_{mn}) {}_c C_m(\eta, {}_c q_{mn}) + \\ & + (\bar{G}_{mn} + \bar{D}_{mn}) \frac{\omega \epsilon_0}{k^2 \ell_1} C e_m(\xi, {}_c q_{mn}) {}_c C_m(\eta, {}_c q_{mn})] + \\ & + \bar{\eta} \sum_m \sum_n [(G_{mn} - D_{mn}) \frac{\omega \epsilon_0}{k^2 \ell_2} C e_m(\xi, {}_c q_{mn}) {}_c C_m(\eta, {}_c q_{mn}) + \\ & + (\bar{G}_{mn} + \bar{D}_{mn}) \frac{\omega \epsilon_0}{k^2 \ell_2} C e_m(\xi, {}_c q_{mn}) {}_c C_m(\eta, {}_c q_{mn})], \end{aligned}$$

где ϵ_0 - электрическая постоянная; ${}_c q_{mn}$ - n -й корень четной модифицированной периодической функции Маттье порядка m [3]; $\beta_{mn} = \sqrt{(\frac{2\pi}{\lambda})^2 - \frac{4q_{mn}}{h^2}}$ - постоянная распро-

странения ЭМВ внутри полости эллиптического поперечного сечения;
 $\ell_1 = \ell_2 = \frac{h}{\sqrt{2}} (\text{ch}2\xi - \cos 2\eta)$ - коэффициенты Ламэ для эллиптической системы координат.

В уравнениях (2) индекс c обозначает четную волну; индекс m указывает порядок модифицированной функции Маттье или ее первой производной; n - номер корня модифицированной функции Маттье порядка m или ее первой производной; ${}_c C_m(\eta, {}_c q_{mn})$, ${}_c C'_m(\eta, {}_c q_{mn})$ - четная периодическая обычная функция Маттье целого порядка с действительными собственными значениями v и q_{mn} и ее первая производная, ${}_c C e_m(\xi, {}_c q_{mn})$, ${}_c C e'_m(\xi, {}_c q_{mn})$ - четная модифицированная периодическая функция Маттье порядка m и ее первая производная.

2. Модальный коэффициент $\{D_{mn}, \bar{D}_{mn}\}$, соответствующий mode, входящей в полость, рассчитываются по уравнению (3), полученному в с помощью теоремы взаимности:

$$\left[\frac{D_{mn}}{\bar{D}_{mn}} \right] = \left(\frac{2\pi}{jk} \right) \frac{1}{W_0 Q_{mn}} \begin{bmatrix} M_{mn}(\theta^i, \varphi^i) & N_{mn}(\theta^i, \varphi^i) \\ -\bar{M}_{mn}(\theta^i, \varphi^i) & \bar{N}_{mn}(\theta^i, \varphi^i) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_\theta \\ I_\varphi \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Уравнение (3) использует следующие обозначения: W_0 - импеданс свободного пространства; Q_{mn} - комплексная мощность, передаваемая в режиме TE или TM модами. Для полой конструкции эллиптического поперечного сечения мощность Q_{mn} определяется как уравнение:

$$Q_{mn} = \frac{1}{2} \int_0^{\xi_0} \int_0^{2\pi} (E_\xi H_\eta - E_\eta H_\xi) d\eta d\xi, \quad (4)$$

где интегрировано по поперечному сечению полости (рис. 3).

Коэффициенты $N_{mn}(\theta^i, \varphi^i)$, $\bar{N}_{mn}(\theta^i, \varphi^i)$, $M_{mn}(\theta^i, \varphi^i)$, $\bar{M}_{mn}(\theta^i, \varphi^i)$ определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} M_{mn}(\theta, \varphi) &= \frac{jk}{4\pi} \left(1 + \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \frac{\beta_{mn}}{\omega \mu_0} \cos \theta \right) ((U_x)_{mn} \cos \varphi + (U_y)_{mn} \sin \varphi), \\ \bar{M}_{mn}(\theta, \varphi) &= \frac{jk}{4\pi} \left(1 + \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \frac{\omega \epsilon_0}{\beta_{mn}} \cos \theta \right) ((U_x)_{mn} \cos \varphi + (U_y)_{mn} \sin \varphi), \\ N_{mn}(\theta, \varphi) &= \frac{jk}{4\pi} (\cos \theta + \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \frac{\beta_{mn}}{\omega \mu_0} \cos \theta) ((U_x)_{mn} \sin \varphi - (U_y)_{mn} \cos \varphi), \\ \bar{N}_{mn}(\theta, \varphi) &= \frac{jk}{4\pi} (\cos \theta + \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \frac{\omega \epsilon_0}{\beta_{mn}} \cos \theta) ((U_x)_{mn} \sin \varphi - (U_y)_{mn} \cos \varphi), \end{aligned} \quad (5)$$

где $(U_{x,y})_{mn} = \int_S (E_{x,y})_{mn} \exp[jk(x \sin \theta \cos \varphi + y \sin \theta \sin \varphi)] dS$,

$(E_x)_{mn}, (E_y)_{mn}$ - тангенциальные составляющие -й моды электрического поля на апертуре полости.

Тангенциальные составляющие электрического поля [4] в эллиптической и прямоугольной системах координат связаны следующим соотношением:

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = [\Psi] \begin{bmatrix} E_\xi \\ E_\eta \end{bmatrix}, \quad (6)$$

где

$$[\Psi] = \frac{(\text{ch}^2 \xi - \cos^2 \eta)^{1/2}}{\text{ch}^2 \xi \sin^2 \eta + \text{sh}^2 \xi \cos^2 \eta} \begin{bmatrix} \text{sh} \xi \cos \eta & -\text{ch} \xi \sin \eta \\ -\text{ch} \xi \sin \eta & \text{sh} \xi \cos \eta \end{bmatrix}.$$

3. Модальные коэффициенты $\{G_{mn}, \bar{G}_{mn}\}$, соответствующие модам, выходящим из полой конструкции, определяются по обобщенным известным формулам матрицы рассеяния R_{mn} полости (в данном случае полости эллиптического поперечного сечения). На апертуре полости (при $z=0$) входящие и выходящие моды связаны известным соотношением:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{G}_{mn} \\ \bar{\mathbf{G}}_{mn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{mn} & \mathbf{O} \\ \mathbf{O} & \bar{\mathbf{R}}_{mn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{D}_{mn} \\ \bar{\mathbf{D}}_{mn} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Матричные коэффициенты (7) для нанесения постоянной толщины радиопоглощающего материала на заднюю стенку резонатора, метод разложения очевиден:

$$\mathbf{R}_{mn}, \bar{\mathbf{R}}_{mn} = \pm \exp(-2j(\beta_{mn}L + \beta'_{mn}L_1)),$$

где L - длина участка полой структуры без радиопоглощающего материала, L_1 - толщина участка радиопоглощающего материала внутри полости, $\beta_{mn} = \sqrt{(\frac{2\pi}{\lambda})^2 - \frac{4q_{mn}}{h^2}}$, $\beta'_{mn} = \sqrt{(\frac{2\pi}{\lambda})^2 \epsilon_r \mu_r - \frac{4q_{mn}}{h^2}}$, где ϵ_r , μ_r - диэлектрическая и магнитная проницаемость радиопоглощающего материала.

При расчете разнообразных волноводных устройств, содержащих диэлектрические вставки, используют метод декомпозиции. Выполнен расчет ЭПР полой структуры эллиптического поперечного сечения проводится нами в рамках модели волновода. В этом случае применяются разработанные для волноводов [5] методы определения поля внутри резонатора, в том числе и методы декомпозиции.

4. Вторичное рассеянное полое структуры эллиптического поперечного сечения, обусловленное выходящими из апертуры модами, рассчитано с использованием закона взаимности в приближении Стрэттона-Чу. Выходящие из полости резонатора моды связаны с рассеянным электромагнитным полем следующим образом:

$$\vec{E}^s = \frac{\exp(-jkr)}{r} (\hat{\theta}F_\theta + \hat{\phi}F_\phi), \quad kr \rightarrow \infty, \quad (8)$$

где $\begin{bmatrix} F_\theta \\ F_\phi \end{bmatrix} = \sum_m \sum_n \begin{bmatrix} M_{mn}(\theta^i, \varphi^i) & \bar{M}_{mn}(\theta^i, \varphi^i) \\ N_{mn}(\theta^i, \varphi^i) & \bar{N}_{mn}(\theta^i, \varphi^i) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} G_{mn} \\ \bar{G}_{mn} \end{bmatrix}$.

Таким образом, рассеянное электромагнитное поле связано с падающей плоской ЭМВ следующими соотношениями:

$$\vec{E}^s = \frac{\exp(-jkr)}{r} (\hat{\theta}S_\theta + \hat{\phi}S_\phi), \quad kr \rightarrow \infty, \quad (9)$$

где

$$\begin{bmatrix} S_\theta \\ S_\phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{\theta\theta} & S_{\theta\phi} \\ S_{\phi\theta} & S_{\phi\phi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_\theta \\ I_\phi \end{bmatrix}. \quad (10)$$

В (10) матричные элементы вычисляются следующим образом:

$$\begin{aligned} S_{\theta\theta} &= \left(\frac{2\pi}{jk}\right) \sum_m \sum_n \frac{1}{W_o Q_{mn}} [R_{mn} M_{mn}(\theta, \varphi) M_{mn}(\theta^i, \varphi^i) - \\ &\quad - \bar{R}_{mn} \bar{M}_{mn}(\theta, \varphi) \bar{M}_{mn}(\theta^i, \varphi^i)], \\ S_{\theta\phi} &= \left(\frac{2\pi}{jk}\right) \sum_m \sum_n \frac{1}{W_o Q_{mn}} [R_{mn} M_{mn}(\theta, \varphi) N_{mn}(\theta^i, \varphi^i) - \\ &\quad - \bar{R}_{mn} \bar{M}_{mn}(\theta, \varphi) N_{mn}(\theta^i, \varphi^i)], \\ S_{\phi\theta} &= \left(\frac{2\pi}{jk}\right) \sum_m \sum_n \frac{1}{W_o Q_{mn}} [R_{mn} N_{mn}(\theta, \varphi) M_{mn}(\theta^i, \varphi^i) - \\ &\quad - \bar{R}_{mn} \bar{N}_{mn}(\theta, \varphi) \bar{M}_{mn}(\theta^i, \varphi^i)], \\ S_{\phi\phi} &= \left(\frac{2\pi}{jk}\right) \sum_m \sum_n \frac{1}{W_o Q_{mn}} [R_{mn} N_{mn}(\theta, \varphi) N_{mn}(\theta^i, \varphi^i) + \\ &\quad + \bar{R}_{mn} \bar{N}_{mn}(\theta, \varphi) \bar{N}_{mn}(\theta^i, \varphi^i)]. \end{aligned} \quad (11)$$

Особенность формул (11) состоит в том, что в общем случае $S_{\theta\phi} \neq 0$ и $S_{\phi\theta} \neq 0$, это связано с несимметрией эллипса для определенных углов падения ЭМВ. В (11) для коэффициентов N_{mn} , \bar{N}_{mn} M_{mn} , \bar{M}_{mn} суммирование для четных волн проводится по индексам $m=0,1,2,\dots$; $n=1,2,3,\dots$, а для нечетных волн $m,n=1,2,3,\dots$. При определении $\theta\theta$ -компоненты бистатической ЭПР расчет проводится по следующей формуле:

$$\sigma_{\theta\theta} = 4\pi |S_{\theta\theta}|^2. \quad (12)$$

Аналогичные выражения записываются для других компонент ЭПР полости. Полагая в формулах (1) $(\theta, \varphi) = (\theta^i, \varphi^i)$, мы можем определить моностатическую ЭПР полой структуры.

Обсуждение результатов. На основе разработанного алгоритма можно выполнить анализ рассеяния электромагнитных волн, поскольку полая конструкция круглого сечения является частным случаем полой конструкции эллиптического сечения. Для проверки алгоритма авторы данного исследования провели тестовые расчеты на полой конструкции круглого сечения. Это соответствовало данным, известным из литературы.

Расчет ЭПР целевой структуры на основе приведенного выше алгоритма производится без учета дифракции электромагнитных волн на краях полости и ее внешней поверхности, что приводит к снижению точности расчета. ЭПР полости при увеличении угла наблюдения. При решении задачи о рассеянии электромагнитных волн на полой конструкции модальным методом необходимо определить поле внутри полости. Для определения структуры всего поля достаточно знать продольные составляющие электрического и магнитного полей, на основе которых можно определить поперечные составляющие электрического и магнитного полей. Для определения продольной составляющей необходимо решить дифференциальное уравнение в соответствующей системе координат (цилиндрической, эллиптической и т. д.). Это позволяет найти собственные функции конкретного волновода, через который проходит поперечная компонента поля. В случае круглого волновода собственными функциями являются, например, функции Бесселя или тригонометрические функции. Напомним, что собственной функцией волновода эллиптического сечения является функция Матье. Эти функции являются решениями уравнения Матье. Зная собственные функции, можно определить поперечную составляющую электромагнитного поля в полости эллиптического сечения. Получены априорные оценки решения краевой задачи в полосе эллиптических уравнений высшего порядка, вырождающихся к кубическому уравнению по одной из переменных с границей $t=0$. Рассмотрим в полосе $R_d^n = \{x \in R^{n-1}, 0 < t < d\}$, где $d > 0$ – некоторое число, уравнение

$$A(D_x, D_{\alpha,t}, \partial_t)v(x, t) = F(x, t) \quad (13)$$

$$\text{где } A(D_x, D_{\alpha,t}, \partial_t)v = L_{2m}(D_x, D_{\alpha,t})v - b\partial_t^3v$$

$$L_{2m}(D_x, D_{\alpha,t}) = \sum_{|\tau|+j \leq 2m} a_{\tau j} D_x^\tau D_{\alpha,t}^j,$$

где $b, a_{\tau j}$ – комплексные числа, тогда

$$\begin{aligned} \text{Im} \bar{b} a_{02m} = 0, D_{\alpha,t} = \frac{1}{i} \sqrt{\alpha(t)} \partial_t \sqrt{\alpha(t)}, \partial_t = \frac{\partial}{\partial t}, \\ D_x^\tau = (i)^\tau \frac{\partial^{\tau_1+\tau_2+\dots+\tau_{n-1}}}{\partial x_1^{\tau_1} \partial x_2^{\tau_2} \dots \partial x_{n-1}^{\tau_{n-1}}}. \end{aligned}$$

На границе $t = 0$ полосы R_d^n задаются условия:

$$B_j(D_x)v|_{t=0} = \sum_{|\tau| \leq k_j} b_{\tau j} D_x^\tau \partial_t^{j-1} v|_{t=0} = G_j(x), \quad (14)$$

Где $j = 1, 2, \dots, l$, с комплексными коэффициентами $b_{\tau j}$.

На границе полосы $t = d$ задаются следующие условия:

$$v|_{t=d} = \partial_t v|_{t=d} = \dots = \partial_t^{m-1} v|_{t=d} = 0 \quad (15)$$

Предположим выполнение следующих условий:

Условие 1. При всех $(\xi, \eta) \in R^n, \eta \in R^1$ справедливо следующее неравенство $\text{Re} \bar{b} L_{2m}(\xi, \eta) \geq c(1 + |\xi|^2 + \eta^2)^m$, где постоянная $c > 0$ не зависит от (ξ, η) .

Условие 2. Для некоторого $s \geq 2m + \max_{j=1,2,\dots,l} (m_1, m_2)$ функция $\alpha(t)$ принадлежит пространству $C^{s-1}[0; d]$, причем $\alpha(0) = \alpha'(0) = 0, \alpha(t) > 0$ при $t > 0$.

Условие 3. $b_j(\xi) \neq 0$ при всех $\xi \in R^{n-1}$.

Для того, чтобы изучить решение задач (13) – (15) следует ввести определенные пространства. Рассмотрим интегральное преобразование F_α . На функциях $v(t) \in C_0^\infty(R_+^1)$ данное преобразование можно записать следующим образом:

$$F_\alpha[u(t)](\eta) = \int_0^{+\infty} u(t) \exp\left(i\eta \int_t^a \frac{d\rho}{\alpha(\rho)}\right) \frac{dt}{\sqrt{\alpha(t)}}$$

В. П Глушко в своей работе показывает, что для данного преобразования можно также построить обратное интегральное преобразование F_α^{-1} , которое можно записать следующим образом: $F_\alpha^{-1}[w(\eta)](t) = \frac{1}{\sqrt{\alpha(t)}} F_{\eta \rightarrow \tau}^{-1}[w(\tau)]|_{\tau=\phi(t)}$

где $F_{\eta \rightarrow \tau}^{-1}$ – обратное преобразование Фурье, которое выглядит следующим образом $F_{\eta \rightarrow \tau}^{-1} = \int_{\mathbb{R}^n} e^{2\pi i x \cdot \xi} g(\xi) d\xi$

Также в работе В. П Глушко об априорных оценках решений краевых задач для любого класса вырождающихся эллиптических уравнений высокого порядка можно обнаружить аналог равенства Парсеваля для интегрального преобразования F_α .

$$\|F_\alpha[u](\eta)\|_{L_2(R^1)} = \sqrt{2\pi} \|u\|_{L_2(R_+^1)}$$

Аналогичное равенство Парсеваля для интегрального преобразования F_α позволяет расширить преобразование (13) до непрерывного преобразования, осуществляющего гомеоморфизм пространств $L_2(R_+^1)$, а также определить преобразование F_α на некоторых классах обобщенных функций. Также из определения преобразования F_α следует следующее свойство. Свойство. Если $u(t) \in C^s[0, d]$ и удовлетворяет следующим условиям

$$u(d) = \partial_t u(d) = \dots = \partial_t^{s-1}(d) = 0,$$

то справедливо равенство

$$F_\alpha[D_{\alpha,t}^j u(t)](\eta) = \eta^j F_\alpha[u(t)](\eta) \text{ при всех } j = 0, 1, 2, \dots, s.$$

Задача (13) – (15) изучается в весовых пространствах типа пространств С.Л. Соболева. Для дальнейшего рассмотрения данного вопроса введем следующие определения.

Определение 1. Пространство $H_{s,\alpha,\frac{2m}{3}}(R_d^n)$ (где $s \geq 0$ – целое число), состоит из трех функций $v(x, t) \in L_2(R_d^n)$ для которых конечна следующая норма:

$$\|v\|_{s,\alpha,\frac{2m}{3}} = \left\{ \sum_{l=0}^{\lfloor \frac{3s}{2m} \rfloor} \left\| F_{\xi \rightarrow x}^{-1} F_\alpha^{-1} \left[(1 + |\xi|^2 + \eta^2)^{\frac{1}{2}(s-\frac{2m}{3})} F_\alpha F_{x \rightarrow \xi} [\partial_t^l v(x, t)] \right] \right\|_{L_2(R_d^n)}^2 \right\}^{\frac{1}{2}},$$

Здесь $F_{x \rightarrow \xi}$ – преобразование Фурье, $F_{\xi \rightarrow x}^{-1}$ – обратное преобразование Фурье.

Если s – такое натуральное число, что число $\frac{2m}{3}$ является целым числом, то эта норма эквивалентна:

$$\|v\|_{s,\alpha,\frac{2m}{3}} = \left\{ \sum_{|\tau|+j+\frac{2m}{3}l \leq s} \left\| D_x^\tau D_{\alpha,t}^j \partial_t^l v \right\|_{L_2(R_d^n)}^2 \right\}^{\frac{1}{2}}.$$

Определение 2. Будем говорить, что функция $g(x)$ принадлежит пространству $H_s(R^{n-1})$ (s – действительное), если для нее конечна норма $\|g\|_s = \left\| F_{\xi \rightarrow x}^{-1} \left\{ (1 + |\xi|^2)^{\frac{s}{2}} F_{\xi \rightarrow x} [g(x)] \right\} \right\|_{L_2(R^{n-1})}$. Рассмотрим две теоремы, имеющих непосредственное отношение к краевой задаче в полосе для одного класса вырождающихся эллиптических уравнений высокого порядка.

Теорема 1. Пусть $s > \max\{2m, \max(m_1, m_2 + \frac{2m}{3}) + \frac{m}{3}\}$ – целое число, $m \geq 3$ и выполнены условия (13) – (15). Тогда для любого решения $v(x, t)$ задачи (13) – (15), принадлежащего неравенству $H_{s, \alpha, \frac{2m}{3}}(R_d^n)$ справедлива априорная оценка

$$\|v\|_{s, \alpha, m} \leq c \left(\|Av\|_{s-2m, \alpha, m} + \sum_{j=1}^2 \|B_j v|_{t=0}\|_{s-m_j - \frac{2m(j-1)}{3} - \frac{m}{3}} \right),$$

где константа $c > 0$, не зависящей от v . Здесь $\|\cdot\|_s$ – норма в пространстве Соболева-Слободецкого $H_s(R^{n-1})$, определенная следующим равенством

$$\|g\|_s = \left\| F_{\xi \rightarrow x}^{-1} \left[(1 + |\xi|)^s F_{x \rightarrow \xi} [g(x)] \right] \right\|_{L_2(R^{n-1})}.$$

В полосе R_d^n наряду с указанным уравнением рассмотрим уравнение

$$A(D_x, D_{\alpha, t}, \partial_t)v(x, t) = F(x, t), \quad (16)$$

$$\text{где } A(D_x, D_{\alpha, t}, \partial_t)v = L_{2m}(D_x, D_{\alpha, t})v - b\partial_t^3 v,$$

$$L_{2m}(D_x, D_{\alpha, t}) = \sum_{|\tau|+j \leq 2m} a_{\tau j} D_x^\tau D_{\alpha, t}^j, \text{ комплексные числа, } \text{Im } \bar{b} a_{0, 2m} = 0.$$

На границе $t = 0$ полосы R_d^n задается следующее условие:

$$B(D_x)v|_{t=0} = \sum_{|\tau| \leq k_j} b_\tau D_x^\tau v|_{t=0} = G(x) \quad (17)$$

с комплексными коэффициентами b_τ . На границе $t = d$ задаются условия вида:

$$v|_{t=d} = \partial_t v|_{t=d} = \dots = \partial_t^{m-1} v|_{t=d} = 0 \quad (18)$$

Теорема 2. Пусть $s \geq \max\{2m, m_1 + \frac{m}{3}\}$ – целое число, $m \geq 3$ и выполнены условия (13) – (15). Тогда для любого решения $v(x, t)$ задачи (16) – (18), принадлежащего неравенству $H_{s, \alpha, \frac{2m}{3}}(R_d^n)$ справедлива априорная оценка

$$\|v\|_{s, \alpha, m} \leq c \left(\|Av\|_{s-2m, \alpha, m} + \|Bv|_{t=0}\|_{s-m_1 - \frac{m}{3}} \right),$$

Где константа $c > 0$ не зависит от v . Таким образом, эти весовые пространства дают априорную оценку решения краевой задачи в полосе для эллиптического уравнения высшего порядка, вырождающегося к кубическому уравнению на одной из границ полосы по одной из переменных. Приведем выражение для поперечной компоненты поля в волноводе эллиптического сечения. Поперечно-магнитная четная волна ${}_c E_{mn}$:

$$\begin{aligned} {}_c E_\xi &= \sum_m \sum_n [G_{mn} \frac{\beta_{mn}}{k^2 \ell_1} {}_c C e_m(\xi, {}_c q_{mn}) {}_c C_m(\eta, {}_c q_{mn}) \sin(\beta_{mn} z)] \\ {}_c E_\eta &= \sum_m \sum_n [G_{mn} \frac{\beta_{mn}}{k^2 \ell_2} {}_c C e_m(\xi, {}_c q_{mn}) {}_c C_m(\eta, {}_c q_{mn}) \sin(\beta_{mn} z)] \\ {}_c H_\xi &= \frac{\omega \epsilon}{\beta_{mn}} {}_c E_\eta \quad ; \quad {}_c H_\eta = \frac{\omega \epsilon}{\beta_{mn}} {}_c E_\xi \quad ; \end{aligned} \quad (19)$$

Поперечно-магнитная нечетная волна ${}_c E_{mn}$:

$$\begin{aligned} {}_s E_\xi &= \sum_m \sum_n [G_{mn} \frac{\beta_{mn}}{k^2 \ell_1} {}_s C e_m(\xi, {}_s q_{mn}) {}_s C_m(\eta, {}_s q_{mn}) \sin(\beta_{mn} z)] \\ {}_s E_\eta &= \sum_m \sum_n [G_{mn} \frac{\beta_{mn}}{k^2 \ell_2} {}_s C e_m(\xi, {}_s q_{mn}) {}_s C_m(\eta, {}_s q_{mn}) \sin(\beta_{mn} z)] \\ {}_s H_\xi &= \frac{\omega \epsilon}{\beta_{mn}} {}_s E_\eta \quad ; \quad {}_s H_\eta = \frac{\omega \epsilon}{\beta_{mn}} {}_s E_\xi \quad ; \end{aligned} \quad (20)$$

Поперечно-магнитная четная волна ${}_c H_{mn}$:

$$\begin{aligned} {}_c E_\xi &= \sum_m \sum_n [G_{mn} \frac{\omega \mu}{k^2 \ell_1} {}_c C e_m(\xi, {}_c q_{mn}) {}_c C_m(\eta, {}_c q_{mn}) \sin(\beta_{mn} z)] \\ {}_c E_\eta &= \sum_m \sum_n [G_{mn} \frac{-\mu \omega}{k^2 \ell_2} {}_c C e_m(\xi, {}_c q_{mn}) {}_c C_m(\eta, {}_c q_{mn}) \sin(\beta_{mn} z)] \\ {}_c H_\xi &= -\frac{\beta_{mn}}{\mu \omega} {}_c E_\eta \quad ; \quad {}_c H_\eta = \frac{\beta_{mn}}{\mu \omega} {}_c E_\xi \quad ; \end{aligned} \quad (21)$$

Поперечно-магнитная нечетная волна ${}_c H_{mn}$:

$$\begin{aligned}
 {}_s E_\xi &= \sum_m \sum_n [G_{mn} \frac{\omega \mu}{k^2 \ell_1} {}_s C e_m(\xi, {}_s q_{mn}) {}_s C_m(\eta, {}_s q_{mn}) \sin(\beta_{mn} z); \\
 {}_s E_\eta &= \sum_m \sum_n [G_{mn} \frac{-\mu \omega}{k^2 \ell_2} {}_s C e_m(\xi, {}_s q_{mn}) {}_s C_m(\eta, {}_s q_{mn}) \sin(\beta_{mn} z); \\
 {}_s H_\xi &= -\frac{\beta_{mn}}{\mu \omega} {}_s E_\eta; \quad {}_s H_\eta = \frac{\beta_{mn}}{\mu \omega} {}_s E_\xi;
 \end{aligned} \tag{22}$$

Таким образом, мы рассмотрели основные этапы алгоритма расчета ЭПР полой структуры эллиптического поперечного сечения, на внутреннюю заднюю стенку которой может быть нанесен металло-диэлектрический материал. Совокупность предложенных алгоритмов могут быть объединены в подсистему анализа, в ней есть расчетные блоки, блоки для анализа точности решения.

Вывод. Рассмотрено решение задачи, направленной на оценку характеристик рассеяния электромагнитных волн на полых структурах, их размеры относятся к резонансной области. Размеры полых структур, имеющих максимальные характеристики рассеяния, определялись на основе комбинации метода интегральных уравнений и метода оптимизации. Создана математическая модель и алгоритм численного анализа особенностей рассеяния плоских радиоволн на полых структурах, которые являются компонентами объектов сложной формы, антенно-фидерных линий и антенных устройств. Получены результаты тестовых расчётов. Предложена структура подсистемы анализа полых структур сложной формы.

Библиографический список:

1. Авдеев В.Б. Моделирование малогабаритных сверхширокополосных антенн: коллективная: Монография/В.Б. Авдеев, А.В. Ашихмин, А.В. Бердышев, С.В. Корочин, В.М. Некрылов, А.В. Останков, Ю.Г. Пастернак, И.В. Попов, А.П. Преображенский/Под ред. В.Б. Авдеева и А.В. Ашихмина. - Воронеж: ВГУ, 2005. - 223 с.
2. Аветисян Т.В. Исследование математических моделей для оценок характеристик рассеяния полых структур/ Аветисян Т.В., Львович Я.Е., Преображенский А.П., Преображенский Ю.П. // Прикладная физика. Воронеж. 2023. № 2. С. 10-14.
3. Аветисян Т.В. Сравнительный анализ моделей оценки характеристик рассеяния полых структур/ Аветисян Т.В., Львович Я.Е., Преображенский А.П./Проблемы физики, математики и техники. Воронеж. 2023. - № 2 (55). - С. 7-10. - DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2023_2_55_7.
4. Ашихмин А. В. Анализ направленных свойств плоского бико-нического вибратора / А.В. Ашихмин, В.К. Маршаков, А.П. Преображенский // Вестник ВГУ. - 2005. - № 1. - С. 13-19.
5. Баев А.Д. Об одной краевой задаче в полосе для вырождающегося эллиптического уравнения высокого порядка/ Баев А.Д., Вестн. Самарск. ун-та. Сер. естеств. науки. 3 (62), 27-39. 2008.
6. Балашов Ю.С., Преображенский А. П. Оценка радиофизических параметров поглощающих покрытий на поверхности объекта сложной формы. // Вестник ВГТУ. - 2005. -Т. 1.-№ 8.-С.76-78.
7. Бахвалов Н.С. К оптимизации методов решения краевых задач при наличии пограничного слоя/ Бахвалов Н.С. // Журн. вычисл. матем. и мат. физ. — 1969. — Т. 9, № 4. — С. 841-859.
8. Вищик М.И. Краевые задачи для эллиптических уравнений, вырождающихся на границе области/ Вищик М.И., Грушин В.В., Матем. сб. 80 (4) (112), 455-491 (1969).
9. Головин А.А. Разработка подсистемы САПР для анализа полых структур с поглощающими покрытиями/ Головин А.А., Мишин А.А. // Фундаментальные исследования. 2014. № 11-10. С. 2146-2149.
10. Глушак А.В. Априорная оценка решения задачи Дирихле для дифференциального уравнения высокого порядка с двумя вырождающимися эллиптическими операторами//Научные ведомости Белгородского государственного университета. Математика. Физика, №20(269).Выпуск 48: 50-57. 2017.
11. Мартынов Н.А., Мироненко Г.Н., Кирьянов О.Е. Оценка границ применимости импедансных граничных условий в задаче дифракции электромагнитной волны на проводящей кромке с покрытием // Радиотехника, 2000, № 6, с. 74-78.
12. Марчук Г.И., Шайдуров В.В. Повышение точности решений разностных схем//Москва: Наука, 1979.
13. Vinogradova, E.D. Rigorous Approach to Analysis of Backscattering from 2D Open-Ended S-shaped Cavities / E.D. Vinogradova, P.D. Smith // Microwave Mediterranean Symposium. – 2022. – P. 1-4.
14. Bozorgi, M.A generalized method for scattering from wide cavities with specified wave functions / M. Bozorgi // Microw Antennas Propag. – 2021. – Vol. 15. – P. 69-79.

References:

1. Ashikhmin A.V. Analysis of directional properties of a flat bionic vibrator. A.V. Ashikhmin, V.K. Marshakov, A. P. Preobrazhensky. *Bulletin of the VSU*. 2005; 1:13-19. (In Russ)
2. Avdeev V.B. Modeling of small-sized ultra-broadband antennas: V.B. Avdeev, A.V. Ashikhmin, A.V. Berdyshev, S.V. Korochin, V.M. Nekrylov, A.V. Ostankov, Yu.G. Pasternak, I.V. Popov, A.P. Preobrazhensky. Edited by V.B. Avdeev and A.V. Ashikhmin. - Voronezh: VSU, 2005:223. (In Russ)
3. Avetisyan T.V., Lvovich Ya.E., Preobrazhensky AP, Preobrazhensky Yu.P. Study of mathematical models for estimating scattering characteristics of hollow structures. *Applied Physics*. 2023;2:10-14. (In Russ)
4. Avetisyan T.V., Lvovich Ya.E., Preobrazhensky AP. Comparative analysis of models for estimating scattering characteristics of hollow structures. *Problems of Physics, Mathematics and Technology*. Voronezh. 2023;2 (55):7-10. DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2023_2_55_7. - EDN: CQTDWZ (In Russ)
5. Baev A.D. On a Boundary Value Problem in a Strip for a Degenerate Elliptic Equation of High Order. *Baev A.D., Vestn. Samara University. Ser. of Natural Sciences*. 2008;3 (62):27-39. (In Russ)
6. Bozorgi, M.A generalized method for scattering from wide cavities with specified wave functions. M. Bozorgi. *Microw Antennas Propag*. 2021;15:69-79. (In Russ)
7. Bakhvalov N.S. On Optimization of Methods for Solving Boundary Value Problems in the Presence of a Boundary Layer. *Bakhvalov N.S. Zh. Vychisl. Mat. i Mat. Phys.* 1969; 9(4): 841-859. (In Russ)
8. Balashov Yu.S. Assessment of radiophysical parameters of absorbing coatings on the surface of an object of complex shape. Yu. S. Balashov, A. P. Preobrazhensky. *Vestnik VGTU*. 2005;1(8):76-78. (In Russ)
9. Golovin A.A. Development of a CAD subsystem for the analysis of hollow structures with absorbing coatings / Golovin A.A., Mishin A.A. *Fundamental research*. 2014;11-10:2146-2149. (In Russ)
10. Glushak A.V. A priori estimate of the solution of the Dirichlet problem for a high-order differential equation with two degenerate elliptic operators. Glushak A.V. *Scientific bulletin of Belgorod State University. Mathematics. Physics*, Belgorod. 2017; 20 (269). Issue 48: 50-57. (In Russ)
11. Marchuk G.I. Improving the accuracy of solutions of difference schemes. Marchuk G.I., Shaidurov V.V. — Moscow.: Nauka, 1979. (In Russ)
12. Martynov N.A., Mironenko G.N., Kiryanov. Assessment of the limits of applicability of impedance boundary conditions in the problem of diffraction of an electromagnetic wave on a conductive edge with a coating. O.E.. *Radio Engineering*, 2000; 6: 74-78. (In Russ)
13. Vishik M.I. Boundary Value Problems for Elliptic Equations Degenerating on the Boundary of a Domain. Vishik M.I., Grushin V.V., Mat. Sb.(1969; 80 (4) (112):455-491 (In Russ)
14. Vinogradova, E.D. Rigorous Approach to Analysis of Backscattering from 2D Open-Ended S-shaped Cavities. E.D. Vinogradova, P.D. Smith. *Microwave Mediterranean Symposium*. 2022; 1-4.

Сведения об авторах:

Гарбузов Владислав Владимирович, преподаватель математики и ИКТ, преподаватель – исследователь; 9999vlad9999@mai.ru

Преображенский Андрей Петрович, доктор технических наук, профессор, руководитель студенческого научного клуба ВИВТ, заведующий кафедрой информационных систем и технологий; app@vivt.ru

Information about authors:

Vladislav V. Garbuzov, Teacher of Mathematics and ICT, Research teacher; 9999vlad9999@mai.ru

Andrey P. Preobrazhensky, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the VIVT Student Scientific Club, Head of the Department of Information Systems and Technologies; app@vivt.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 12.09.2024.

Одобрена после рецензирования/ Revised 09.11.2024.

Принята в печать/Accepted for publication 30.12.2024.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 721.02

DOI: 10.21822/2073-6185-2025-52-1-77-86



Оригинальная статья/Original article

Перспективы применения BIM для создания устойчивых и энергоэффективных зданий в различных климатических условиях

Малавараге Н.С. Деваража, А.А. Семенов

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

Резюме. Цель. Целью исследования является оценка перспектив применения технологий информационного моделирования для решения задач проектирования зданий и сооружений в неблагоприятных климатических условиях. **Метод.** Проанализировано влияние применения технологий информационного моделирования (BIM) на разработку устойчивых и энергоэффективных зданий. Описываются преимущества применения BIM-технологий в проектировании и строительстве, в том числе с применением технологии генеративного дизайна. Изложены этапы работы с BIM-моделями, описаны преимущества BIM-моделирования над традиционным моделированием. Раскрыты основные аспекты и задачи проектирования в сложных климатических условиях. Рассматривается пример энергоэффективного здания в сложных климатических условиях, построенного с использованием BIM. **Результат.** Разработан скрипт в среде визуального программирования Dynamo, который позволяет учесть влияние неблагоприятных климатических условий (ветра) для конкретной местности. Скрипт дает возможность подобрать форму фасада и ориентацию здания в пространстве для минимизации неблагоприятного воздействия ветра. Данные, используемые для определения силы ветра и его направления в разное время года, берутся из файлов EPW. **Вывод.** Показана ключевая роль использования BIM-технологий при разработке устойчивых и энергоэффективных зданий в различных климатических условиях. Отмечается перспективность предложенного подхода и возможность дальнейшего развития исследований в области визуального программирования для проектирования энергоэффективных зданий.

Ключевые слова: BIM, моделирование, энергоэффективность здания, комплексное проектирование, климатические особенности.

Для цитирования: Малавараге Н.С. Деваража, А.А. Семенов. Перспективы применения BIM для создания устойчивых и энергоэффективных зданий в различных климатических условиях. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025; 52(1):77-86. DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-1-77-86

**Prospects for applying bim to create sustainable and energy-efficient buildings
in different climatic conditions**

Malavarage N.S. Dewaraja, A.A. Semenov

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering,
4 2ndKrasnoarmeyskaya St. 4, Saint Petersburg 190005, Russia

Abstract. Objective. The aim of the study is to assess the prospects for using building information modeling technologies to solve problems of designing buildings and structures in adverse climatic conditions. **Method.** The article analyzes the impact of using building information modeling (BIM) technologies on the development of sustainable and energy-efficient buildings. The advantages of using BIM technologies in design and construction, including the use of generative design technology, are described. The stages of working with BIM models are outlined, the advantages of BIM modeling over traditional modeling are described. The main aspects and tasks of designing in difficult climatic conditions are discussed. An example of an

energy-efficient building in difficult climatic conditions, built using BIM, is considered. **Result.** A script has been developed in the Dynamo visual programming environment, which allows taking into account the influence of adverse climatic conditions (wind) for a particular area. The script makes it possible to select the shape of the facade and the orientation of the building in space to minimize the adverse effects of the wind. The data used to determine the wind strength and its direction at different times of the year are taken from EPW files. **Conclusion.** The paper draws conclusions about the key role of using BIM technologies in developing sustainable and energy-efficient buildings in various climatic conditions. It notes the prospects of the proposed approach and the possibility of further development of research in the field of visual programming for designing energy-efficient buildings.

Keywords: BIM, modeling, building energy efficiency, integrated design, climate features

For citation: Malavarage N.S. Dewaraja, A.A. Semenov. Prospects for applying bim to create sustainable and energy-efficient buildings in different climatic conditions. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2025;52(1):77-86. (In Russ)
DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-1-77-86

Введение. Комплексное проектирование энергоэффективных зданий требует учета множества параметров, которые в традиционных системах проектирования часто не учитываются. Это усложняет оценку энергоэффективности проектов. BIM представляет собой перспективный метод для решения данной проблемы [1–3].

Технологии информационного моделирования (BIM) в строительстве представляют собой значительный шаг в эволюции отрасли, предлагая комплексный подход к управлению данными и процессами в проектах [4–8]. BIM объединяет данные о здании в единую высокодетализированную модель, включающую архитектурное проектирование, инженерные расчеты и сметную документацию, что позволяет специалистам более точно планировать, проектировать и эксплуатировать здания [9].

В работе [4] авторами формулируются основные преимущества и трудности, с которыми сталкиваются компании при интеграции этих технологий. Отдельно отмечается возможность взаимодействия различных специалистов в реальном времени и возможность обнаружения ошибок в проекте еще на стадии проектирования. К основным проблемам авторы относят финансовые затраты на обучение персонала и приобретение соответствующего программного обеспечения. Также выделяется сложность изменения устоявшихся рабочих процессов и необходимость качественной подготовки персонала для эффективного использования технологий.

Еще одно направление развития технологий, которое тесно связано с BIM, это генеративное проектирование [10–12]. В работе [12] авторами обсуждается применение данной технологии для решения различных инженерных задач. Основным преимуществом отмечается возможность создания эргономичных изделий. К недостаткам технологии авторы относят эстетические аспекты, необходимость ввода точных входных данных, ограничения в выборе материалов. Также в статье предлагается ряд рекомендаций для эффективного развития генеративного проектирования. В работе [11] подробно описывается использование программных комплексов, таких как Rhinoceros 3D, Grasshopper, Revit и Dynamo в современном проектировании. Эти инструменты помогают архитекторам генерировать проектные решения, основанные на криволинейной геометрии. Авторами отмечается необходимость разработки новых алгоритмов и скриптов для обеспечения удобства и экономии материалов без потери прочности. Предложен алгоритм параметрического проектирования пандуса для маломобильных групп населения. Также перспективным направлением является развитие и применение технологий визуального программирования, дополняющих возможности программных комплексов информационного моделирования [13–15]. Такой подход основывается на использовании программных комплексов, таких как Autodesk Revit и платформа визуального программирования Dynamo [16–18].

В работе [13] авторами рассмотрены различные аспекты автоматизации разделов рабочей документации в системах автоматизированного проектирования, указаны программы, используемые для разработки конкретных разделов. Отмечается, что потребность в автоматизированном создании различных спецификаций и ведомостей выполняется с помощью встроенных функций Autodesk Revit. Однако, для создания развёрток, требуется применение среды визуального программирования Dynamo. В этом контексте выделяются ноды «Python Script» и «Object.Type», позволяющие обращаться к Revit на языке программирования Python. Приведены примеры использования данных инструментов для создания развёрток фасадов, что демонстрирует практическую применимость данного метода.

В работе [19] затрагиваются актуальные аспекты цифровизации архитектурного моделирования промышленных объектов, в первую очередь, за счет применения технологий искусственного интеллекта и машинного обучения. Исследование затрагивает задачи анализа существующих алгоритмов классификации трехмерных графов и разработки функционального подхода к машинному обучению для создания концептуального дизайна промышленных объектов. Методы, применяемые в работе, включают кластерную классификацию, кластеризацию на основе деревьев решений и алгоритмы глубокого обучения для классификации графов. Конечным результатом исследования стали разработанные рекомендации по применению алгоритмов глубокого обучения в проектировании трехмерных промышленных объектов.

Постановка задачи. Целью данной работы является оценка перспектив применения технологий информационного моделирования для решения задач проектирования зданий и сооружений в неблагоприятных климатических условиях.

Климатические условия играют важную роль в проектировании зданий, оказывая значительное влияние на выбор архитектурных решений, конструктивных элементов и инженерных систем. Разнообразие климатических зон требует индивидуального подхода к каждому проекту, чтобы обеспечить энергоэффективность и устойчивость здания. В зависимости от географического расположения, сооружения могут подвергаться разным нагрузкам, обусловленным особенностями климата, таким как экстремальные температуры, высокая влажность, сильные ветры и осадки.

В табл.1 отражены ключевые задачи и аспекты проектирования зданий в различных климатических зонах. Как видно из табл.1, в холодных климатических зонах проектирование зданий должно учитывать необходимость минимизации теплопотерь и обеспечения эффективного утепления. Особое внимание должно уделяться выбору материалов с высокими теплоизоляционными свойствами, а также проектированию эффективных систем отопления. В таких регионах часто используются многослойные конструкции стен и кровли, включающие теплоизоляционные слои, а также энергоэффективные оконные системы с низким коэффициентом теплопередачи [20].

В жарких климатических условиях, напротив, основной задачей проектировщиков является защита здания от перегрева и обеспечение эффективного охлаждения. Здесь особое значение приобретает ориентация здания, использование солнцезащитных устройств и материалов с высокой отражающей способностью. Системы кондиционирования и естественной вентиляции также играют важную роль в поддержании комфортных условий внутри здания, а проектирование зеленых крыш и фасадов может значительно снизить тепловую нагрузку и улучшить микроклимат вокруг здания [21].

Обеспечение защиты от влаги и плесени – главное требование к проектированию здания во влажном климате. В таких климатических условиях особенно важно правильно проектировать системы дренажа и гидроизоляции, а также выбирать материалы, устойчивые к воздействию влаги. Системы вентиляции должны обеспечивать эффективный воздухообмен для предотвращения конденсации и поддержания здорового микроклимата внутри помещений [20].

Таблица 1. Ключевые аспекты проектирования зданий в зависимости от климатических условий

Table 1. Key aspects of building design depending on climatic conditions

Климатические условия Climate conditions	Основные задачи проектирования Main design tasks	Ключевые аспекты проектирования Key design aspects
Холодный климат Cold climate	Минимизация теплопотерь и обеспечение эффективного утепления Minimizing heat loss and ensuring effective insulation	использование материалов с высокими теплоизоляционными свойствами; проектирование эффективных систем отопления; использование многослойных конструкций стен и кровли с теплоизоляционными слоями; использование энергоэффективных оконных систем с низким коэффициентом теплопередачи.
Жаркий климат Hot climate	Защита от перегрева и обеспечение эффективного охлаждения Protection from overheating and ensuring effective cooling	оптимальная ориентация здания для минимизации воздействия прямых солнечных лучей на основные поверхности; использование солнцезащитных устройств и материалов с высокой отражающей способностью; использование систем кондиционирования и естественной вентиляции; проектирование зеленых крыш и фасадов для снижения тепловой нагрузки и улучшения микроклимата.
Влажный климат Humid climate	Защита от влаги и плесени Protection from moisture and mold	проектирование систем дренажа и гидроизоляции; выбор материалов, устойчивых к воздействию влаги; системы вентиляции для эффективного воздухообмена, предотвращения конденсации и поддержания здорового микроклимата внутри помещений.
Сильные ветры и осадки Strong winds and precipitation	Устойчивость и безопасность сооружений Stability and safety of structures	усиление конструктивных элементов для обеспечения устойчивости к ветровым нагрузкам; использование прочных кровельных и фасадных систем; использование ветровых экранов и других защитных элементов; эффективные системы водоотведения и защиты от подтоплений.

Методы исследования. Современные технологии, включая информационное моделирование (ТИМ, BIM), позволяют учитывать климатические условия на всех этапах проектирования. С помощью BIM можно моделировать различные климатические сценарии и анализировать их влияние, что помогает принимать обоснованные проектные решения. Технологии информационного моделирования представляют собой набор инструментов и методов, которые объединяют все данные о здании в единую модель, включая архитектурное проектирование, инженерные расчеты и сметную документацию, и охватывают весь жизненный цикл здания. BIM позволяет не только точнее планировать и проектировать здания, но и эффективнее их эксплуатировать [22].

Процесс разработки информационной модели включает в себя создание архитектурной 3D-модели с высокой детализацией архитектурных решений; разработку инженерных и конструкционных моделей, в том числе выполнение расчетов нагрузок, создание чертежей и спецификаций; обязательную проверку моделей архитектурных и конструктивных решений на коллизии – наличие несостыковок и исправление ошибок; разработку проекта организации строительства: автоматическое составление календарного графика и логистических данных; обеспечение эксплуатации здания: использование информационной модели для управления объектом, контроля инженерных систем и предупреждения аварийных ситуаций [22].

Обсуждение результатов. Рассмотрим более детально одно из важных преимуществ BIM – возможность оптимизировать энергоэффективность зданий на всех этапах их жизненного цикла [23].

На этапе концептуального проектирования BIM позволяет архитекторам и инженерам выполнять сложные расчеты тепловых потоков, оценивать энергоэффективность различных вариантов планировочных решений, материалов и инженерных систем. Использо-

вание BIM-систем для анализа солнечной радиации, термической инерции и теплопередачи через строительные ограждающие конструкции позволяет определить оптимальную ориентацию здания, параметры остекления и типы изоляционных материалов. Это, в свою очередь, помогает снизить теплопотери зимой и уменьшить перегрев летом, что особенно важно для регионов с экстремальными климатическими условиями.

На этапе проектирования BIM-технологии обеспечивают интеграцию всех инженерных систем (отопления, вентиляции, кондиционирования воздуха, освещения) в единую модель, что позволяет избежать ошибок и недоработок, связанных с несогласованностью различных проектных решений [24]. Более того, BIM-модели дают возможность провести имитацию различных сценариев эксплуатации здания и оптимизировать работу всех инженерных систем, чтобы снизить энергопотребление и эксплуатационные расходы.

Одним из наиболее значимых преимуществ BIM над традиционным проектированием для повышения энергоэффективности зданий является возможность проведения детализированных расчетов и анализа на основе реальных данных. Это включает в себя использование данных о местном климате, особенностях ландшафта и окружающей застройки. BIM-модели могут учитывать изменения погодных условий и сезонные колебания температур, что позволяет более точно прогнозировать энергопотребление здания в течение года. Применение BIM-технологий также важно на этапе эксплуатации здания. BIM-модели позволяют эффективно управлять объектом, проводя мониторинг состояния инженерных систем и оперативно реагируя на возникающие проблемы.

Например, интеграция BIM с системами автоматизации зданий (BAS) позволяет отслеживать потребление энергии в реальном времени, выявлять неэффективные участки и принимать меры по их оптимизации. Это приводит к снижению эксплуатационных затрат и продлению срока службы оборудования. Данные, собранные в процессе эксплуатации здания, могут быть использованы для анализа эффективности примененных решений и разработки новых, более устойчивых подходов к проектированию и строительству.

Обобщая вышесказанное, можно сделать вывод о том, что использование BIM на каждом этапе жизненного цикла здания способствует его энергоэффективности, начиная от концептуального проектирования и заканчивая эксплуатацией и мониторингом состояния инженерных систем. Применение BIM позволяет более точно прогнозировать энергопотребление, снижать эксплуатационные затраты и продлевать срок службы оборудования, обеспечивая высокий уровень комфорта и устойчивости зданий в различных климатических условиях.

Необходимо отметить, что BIM позволяет эффективно планировать и управлять ресурсами, необходимыми для строительства и эксплуатации здания. Точные расчеты объемов материалов и оборудования, а также оптимизация процессов строительства позволяют значительно сократить отходы и снизить затраты, моделировать и анализировать различные сценарии использования ресурсов, что способствует принятию более обоснованных решений. Примером энергоэффективного здания, построенного с использованием технологии BIM в условиях сложного климата, может послужить проектирование и строительство многофункционального комплекса «Лахта Центр» в Санкт-Петербурге. Участники проекта отмечают, что основным преимуществом BIM в данном случае была возможность работать в одной модели, независимо от географического положения участников. Проектирование и строительство небоскреба включало участие граждан из 18 стран, а общий штат сотрудников превышал 20 тысяч человек [26]. Облачные технологии на базе BIM-360 помогали синхронизировать работу архитекторов из разных стран и регионов России в единой модели. Стоит отметить, что при проектировании и строительстве «Лахта Центра» были учтены непростые климатические и географические особенности местности, а именно:

1. Близость к Финскому заливу, которая обусловила сильные ветра, слабость грунта и резкие перепады температуры.

2. Северное расположение здания. Подобные высокие здания ранее не строились в таком влажном климате и на такой широте. Для предотвращения образования льда на больших металлических поверхностях шпиля была разработана уникальная система антиобледенения, поскольку несколько месяцев в году 100-метровый шпиль будет находиться в зоне низких облаков, что увеличивает риск образования конденсата на фасадах.

В Лахта Центре используются передовые технологии для обеспечения энергоэффективности здания. В облицовке применен принцип «интеллектуального фасада»: воздушное пространство между слоями остекления обеспечивает теплоизоляцию и естественную вентиляцию, снижая тем самым расходы на отопление и кондиционирование [27]. В Лахта Центре применяются «охлаждающие балки», которые являются своеобразными радиаторами, расположенными в районе потолка, и естественное проветривание благодаря двойным фасадам в определенных частях здания. Это позволяет создать оптимальные условия для циркуляции свежего воздуха и естественной вентиляции внутри помещений [25].

Для еще большей энергоэффективности здание оснащено аккумуляторами холода, которые накапливают энергию в периоды минимальной нагрузки на электросеть и используют ее в периоды пиковой нагрузки. Это позволяет снизить потребление электроэнергии в пиковые часы до 15 %. В Лахта Центре установлены датчики присутствия, которые определяют активность людей в помещениях и автоматически управляют освещением, вентиляцией и лифтами [25]. Архитектурные и технические решения Лахта Центра во многих аспектах являются новаторскими не только для России, но и для всего мира. Сложнейшие проектные задачи удалось решить благодаря использованию передовых BIM-технологий, параметрического моделирования и визуального программирования. Подобным образом авторами данной работы предлагается решать поставленные задачи в области учета сложных климатических условий.

Одним из аспектов обеспечения энергоэффективности и комфорtnого проживания является снижение воздействия влияния ветра на здание, и, в том числе, на его внутреннюю территорию, если речь идет о здании сложной формы или жилом комплексе. Используя данные о действии ветров в определенной местности в течение года, можно проанализировать суммарное воздействие ветра и подобрать такую форму и ориентацию в пространстве для здания, чтобы снизить влияние неблагоприятных погодных условий.

Для достижения этой цели и автоматизации предлагаемого подхода был разработан скрипт в Dynamo (среде визуального программирования для Revit), рис. 1.

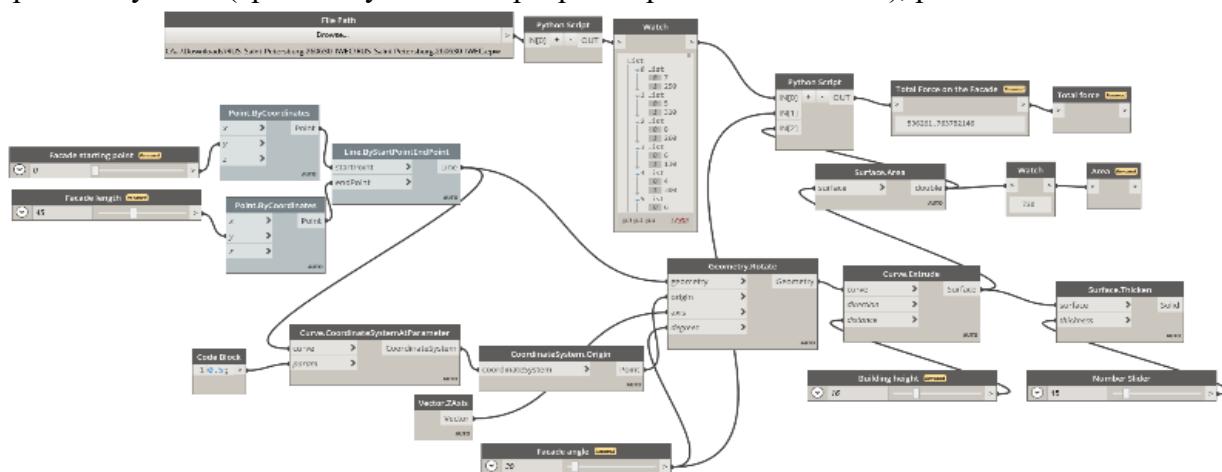


Рис. 1- Скрипт в Dynamo для подбора ориентации здания
 в зависимости от ветрового воздействия

Fig. 1- Prospect for application to create installations and energy efficiency
 of buildings in different climate conditions

Данный скрипт позволяет получить данные из EPW-файлов, содержащих информацию о действии ветров в указанной местности (используются максимальные значения в течение каждого дня в году). Данные характеризуются не только скоростью ветра, но и его направлением. Вычисляя угол между этим направлением и ориентацией фасада здания, становится возможным определить, насколько сильное воздействие оказывается на фасад. Математическая составляющая скрипта реализуется на языке программирования Python, блоки кода которого можно использовать в Dynamo в специальных нодах.

Фрагмент такого скрипта, реализующего вычисление силы ветрового воздействия, показан на рис. 2.

```
1 import math
2 max_wind_data = IN[0] # Входные данные - список кортежей (скорость ветра, направление ветра)
3 facade_angle = IN[1] # Угол ориентации фасада (градусы от севера)
4 facade_area=IN[2]
5 rho = 1.225 # Плотность воздуха, кг/м3
6 A_fasad = facade_area # Площадь фасада, м2
7 Cd = 1.2 # Коэффициент аэродинамического сопротивления
8 def wind_force(v_max, alpha_wind, alpha_fasad):# Функция для расчета силы ветра за день
9     theta = abs(alpha_wind - alpha_fasad)
10    if theta > 90:
11        return 0
12    cos_theta = math.cos(math.radians(theta))
13    return 0.5 * rho * v_max**2 * A_fasad * Cd * cos_theta
14 total_wind_force_year = 0 # Инициализация переменной для суммирования силы ветра за год
15 for day_data in max_wind_data: # Расчет силы ветра для каждого дня и суммирование
16     v_max = day_data[0] # Максимальная скорость ветра за день (из списка кортежей)
17     alpha_wind = day_data[1] # Направление ветра за день (из списка кортежей)
18     total_wind_force_year += wind_force(v_max, alpha_wind, facade_angle)
19 OUT = total_wind_force_year
```

Рис. 2 - Скрипт определения ветрового воздействия в Python

Fig. 2 - Script for determining wind impact in Python

На основании полученных подобным образом данных становится возможным подобрать оптимальную с точки зрения минимизации ветрового воздействия форму и ориентацию здания в пространстве (рис. 3).

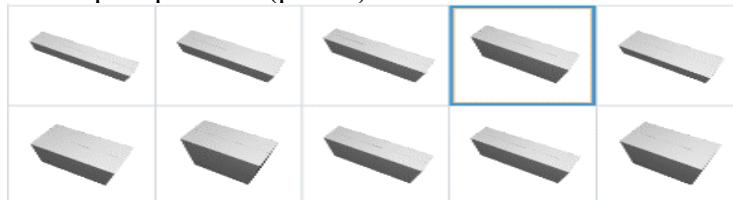


Рис. 3 - Выбор варианта формы здания по результатам моделирования

Fig. 3 - Selecting a building shape option based on the modeling results

Разработка данного скрипта позволила учесть влияние неблагоприятных климатических условий (ветра) для конкретной местности. Дальнейшее развитие предложенного подхода позволит учесть и другие климатические факторы, значительно облегчить работу проектировщика, а также позволит разработать рекомендации на основе компьютерного моделирования проектных решений.

Вывод. Технологии информационного моделирования зданий существенно упрощают процесс проектирования энергоэффективных зданий. Помимо общеизвестных преимуществ BIM, следует отметить возможность проведения концептуального анализа энергоэффективности уже на ранних этапах проектирования, что способствует принятию обоснованных решений. BIM-модели позволяют рассматривать различные варианты размещения оборудования и систем, выбирая оптимальные решения с точки зрения энергоэффективности. В условиях разнообразных климатических зон России использование BIM позволяет адаптировать проектные решения к конкретным климатическим условиям, обеспечивая энергоэффективность зданий в различных регионах. Важным также является активное развитие технологий генеративного дизайна, которые дают возможность перебирать большое количество проектных решений, учитывая широкий спектр входных параметров. Дальнейшие исследования авторов будут направлены на разработку методик и инструментария для учета различных климатических параметров при разработке информационных моделей.

Благодарности. Данная работа выполнена в рамках реализации Инновационного образовательного проекта «Инновационная методика формирования цифровых профессиональных компетенций обучающихся и специалистов строительной отрасли» на базе Федеральной инновационной площадки ФГБОУ ВО СПбГАСУ.

Acknowledgments. This work was carried out within the framework of the implementation of the Innovative educational project "Innovative methodology for the formation of digital professional competencies of students and specialists in the construction industry" on the basis of the Federal Innovation Platform of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education SPbGASU.

Библиографический список:

1. Andreani M., Bertagni S., Biagini C., Mallo F. 7D BIM for Sustainability Assessment in Design Processes: A Case Study of Design of Alternatives in Severe Climate and Heavy Use Conditions // Architecture and Engineering. 2019. Vol. 4. No. 2. P. 3–12. DOI: 10.23968/2500-0055-2019-4-2-3-12. EDN: YYNSQL.
2. Nurulla S., Purushotham D.V., Yuvaraj M.S., Kiran Sai S. Energy Efficient Design for a Conventional Building using BIM Tools // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2023. Vol. 1280. No. 1. P. 012030. DOI: 10.1088/1755-1315/1280/1/012030. EDN: SQINIK.
3. Pezeshki Z., Ivari S.A.S. Applications of BIM:A Brief Review and Future Outline//Archives of Computational Methods in Engineering. 2018; 25:273–312.DOI:10.1007/s11831-016-9204-1.EDN: CVHWMN.
4. Бекирова О.Н., Малютина А.Н. Преимущества использования и трудности внедрения BIM-технологий в современном строительстве // Управление строительством. 2019. № 3(16). С. 110–119. EDN: KGLHGE.
5. Заторский С.П., Шумилов К.А., Семенов А.А. Организация процесса комплексного BIM-проектирования технологических объектов // Жилищное строительство. 2024. № 1–2. С. 72–79. DOI: 10.31659/0044-4472-2024-1-2-72-79. EDN: EAMGGI.
6. Рыбакова А.О., Якубович А.М. Тенденции развития технологии информационного моделирования зданий // Наука и бизнес: пути развития. 2020. № 12(114). С. 136–138. EDN: CJYYPY.
7. Toan N.Q., Tam N.V., Diep T.N., Anh Ph.X. Adoption of Building Information Modeling in the Construction Project Life Cycle: Benefits for Stakeholders // Architecture and Engineering. 2022. Vol. 7. No. 1. P. 56–71. DOI: 10.23968/2500-0055-2022-7-1-56-71. EDN: GJOGSA.
8. Бовтеев С.В. Современное состояние и перспективы применения 4D-моделирования в российской практике строительства // Вестник гражданских инженеров. 2023. № 2 (97). С. 65–74. DOI: 10.23968/1999-5571-2023-20-2-65-74. EDN: PCQSAJ.
9. Кузина О.Н. Информационное моделирование стоимости объекта строительства на каждом этапе жизненного цикла//Научно-технический вестник Поволжья. 2019. № 1. С. 107–111. EDN: YXGDVZ.
10. Кривенко А.А., Моор В.К., Гаврилов А.Г. Генеративное проектирование как средство формирования архитектурных объектов // Архитектура и дизайн: история, теория, инновации. 2017. № 2. С. 203–206. EDN: YYZDLR.
11. Матюхина М.А., Игнатова Е.В. Генеративный дизайн в малых архитектурных формах на примере пандуса для маломобильных групп населения // Строительное производство. 2021. № 2. С. 81–86. DOI: 10.54950/26585340_2021_2_81. EDN: AMXMIN.
12. Берсанов М.Д.А., Джабраилов З.А., Магомедов И.А. Генеративное проектирование и его недостатки в инженерном проектировании // Тенденции развития науки и образования. 2023. № 99–7. С. 161–163. DOI: 10.18411/trnio-07-2023-406. EDN: PWNVBF.
13. Машкин А.А., Талипова Л.В., Киселев С.В. Применение генеративного проектирования при формировании объемно-планировочных решений объектов строительства // Неделя науки ИСИ: Сборник материалов Всероссийской конференции. СПб.: ФГАОУ ВО СПбПУ Петра Великого, 2023. Т. 2. С. 83–85. EDN: GMHGCZ.
14. Shishina D., Sergeev P. REVIT | DYNAMO: Designing Objects of Complex Forms. Toolkit and Process Automation Features // Architecture and Engineering. 2019. Vol. 4. No. 3. P. 30–38. DOI: 10.23968/2500-0055-2019-4-3-30-38. EDN: UHIECE.
15. Семенов А.А., Литвинов П.В. Применение Dynamo для преобразования физических форм в аналитические в программном комплексе Revit // Новые информационные технологии в архитектуре и строительстве: материалы VI Международной научно-практической конференции. Екатеринбург: УрГАХУ им. Н.С. Алфёрова, 2023. С. 69. EDN: IBWQBG.

16. Cho J., Kim C., Song Y., Kang J., Yeon J. Lumped record management method using BIM and dynamo for spalling maintenance // Automation in Construction. 2024. Vol. 160. P. 105324. DOI: 10.1016/j.autcon.2024.105324. EDN: JQAQMA.
17. Khan H. Microclimatic architectural design by interfacing grasshoppers and Dynamo with Rhino and Revit // Measurement: Sensors. 2024. Vol. 33. P. 101143. DOI: 10.1016/j.measen.2024.101143. EDN: EKJQEF.
18. Mikhailov S., Mikhailova A., Nadyrshine N., Nadyrshine L. BIM-technologies and digital modeling in educational architectural design // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 890. P. 012168. DOI: 10.1088/1757-899X/890/1/012168. EDN: RCNIBS.
19. Меркушев К.А., Шабиев С.Г. Проблемы цифровизации архитектурного моделирования промышленных объектов//Архитектура, градостроительство и дизайн. 2021. № 4 (30). С. 29–37. EDN: QXSSRE.
20. Алоян Р.М., Федосов С.В., Опарина Л.А. Энергоэффективные здания – состояние, проблемы и пути решения. Иваново: ПресСто, 2016. 276 с.
21. Онкаев В.А., Серпокрылов Н.С., Бадрудинова А.Н., Джальчинова Т.Б., Кедеева О.Ш. Влияние климатических условий на проектирование и строительство зданий и сооружений в Республике Калмыкия // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2022. Т. 24. № 2. С. 95–105. DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-2-95-105. EDN: FOXBBG.
22. Azhar S., Carlton W.A., Olsen D., Ahmad I. Building information modeling for sustainable design and LEED® rating analysis // Automation in Construction. 2011. Vol. 20. No. 2. P. 217–224. DOI: 10.1016/j.autcon.2010.09.019.
23. Гинзбург А.В. BIM-технологии на протяжении жизненного цикла строительного объекта // Информационные ресурсы России. 2016. № 5(153). С. 28–31. EDN: WTQPPH.
24. Целищева В.К., Якупова А.Ш., Суханов К.О. Использование энергетического моделирования для повышения энергоэффективности здания // BIM-моделирование в задачах строительства и архитектуры: материалы VI Международной научно-практической конференции. Под общ. ред. А.А. Семенова. СПб.: СПбГАСУ, 2023. С. 395–401. DOI: 10.23968/BIMAC.2023.055. EDN: FZXHFG.
25. Илюхина Е.А., Лахман С.И., Миллер А.Б., Травуш В.И. Конструктивные решения высотного здания «Лахта Центр» в Санкт-Петербурге // Academia. Архитектура и строительство. 2019. № 3. С. 110–121. DOI: 10.22337/2077-9038-2019-3-110-121. EDN: MLORRC.
26. URL: <https://1build.ru/technologies/lahta-czentr/> (дата обращения: 08.06.2024)
27. URL: <https://lenta.ru/articles/2016/06/29/zamki/> (дата обращения: 08.06.2024)

References:

1. Andreani M., Bertagni S., Biagini C., Mallo F. 7D BIM for Sustainability Assessment in Design Processes: A Case Study of Design of Alternatives in Severe Climate and Heavy Use Conditions. *Architecture and Engineering*. 2019; 4(2):3–12. DOI: 10.23968/2500-0055-2019-4-2-3-12. EDN: YYNSQL.
2. Nurulla S., Purushotham D.V., Yuvaraj M.S., Kiran Sai S. Energy Efficient Design for a Conventional Building using BIM Tools. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2023;1280(1):012030. DOI: 10.1088/1755-1315/1280/1/012030. EDN: SQINIK.
3. Pezeshki Z., Ivari S.A.S. Applications of BIM: A Brief Review and Future Outline. *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2018;25:273–312. DOI: 10.1007/s11831-016-9204-1. EDN: CVHWMN.
4. Bekirova O.N., Malyutina A.N. Advantages of Using and Difficulties of Implementing BIM Technologies in Modern Construction. *Construction Management*. 2019;3(16):110–119. EDN: KGLHGE (In Russ)
5. Zatorskiy S.P., Shumilov K.A., Semenov A.A. Organization of the process of integrated BIM design of technological facilities. *Housing construction*. 2024;1–2:72–79. DOI: 10.31659/0044-4472-2024-1-2-72-79. EDN: EAMGGI. (In Russ)
6. Rybakova A.O., Yakubovich A.M. Trends in the development of building information modeling technology. *Science and business: development paths*. 2020;12(114):136–138. EDN: CJYYPY. (In Russ)
7. Toan N.Q., Tam N.V., Diep T.N., Anh Ph.X. Adoption of Building Information Modeling in the Construction Project Life Cycle: Benefits for Stakeholders. *Architecture and Engineering*. 2022;7(1):56–71. DOI: 10.23968/2500-0055-2022-7-1-56-71. EDN: GJOGSA. (In Russ)
8. Bovteev S.V. Current State and Prospects of Applying 4D Modeling in Russian Construction Practice. *Bulletin of Civil Engineers*. 2023;2(97):65–74. DOI: 10.23968/1999-5571-2023-20-2-65-74. EDN: PCQSAJ. (In Russ)
9. Kuzina O.N. Information modeling of the cost of a construction project at each stage of its life cycle. *Scientific and Technical Bulletin of the Volga Region*. 2019;1:107–111. EDN: YXGDVZ. (In Russ)
10. Krivenko A.A., Moor V.K., Gavrilov A.G. Generative design as a means of forming architectural objects. *Architecture and design: history, theory, innovation*. 2017; 2:203–206. EDN: YYZDLR. (In Russ)
11. Matyukhina M.A., Ignatova E.V. Generative design in small architectural forms using the example of a ramp for people with disabilities. *Construction production*. 2021;2:81–86. DOI: 10.54950/26585340_2021_2_81. EDN: AMXMJN. (In Russ)

12. Bersanov M.D.A., Dzhabrailov Z.A., Magomedov I.A. Generative design and its shortcomings in engineering design. *Trends in the Development of Science and Education*. 2023;99-7:161–163. DOI: 10.18411/trnio-07-2023-406. EDN: PWNVBF. (In Russ)
13. Mashkin A.A., Talipova L.V., Kiselev S.V. Application of generative design in the formation of space-planning solutions for construction projects. *ISI Science Week: Collection of materials of the All-Russian conference*. SPb.: FGAOU VO SPbPU Petra Velikogo, 2023; 2: 83–85. EDN: GMHGCZ. (In Russ)
14. Shishina D., Sergeev P. REVIT | DYNAMO: Designing Objects of Complex Forms. Toolkit and Process Automation Features. *Architecture and Engineering*. 2019;4:3:30–38. DOI: 10.23968/2500-0055-2019-4-3-30-38. EDN: UHIECE.
15. Semenov A.A., Litvinov P.V. Application of Dynamo for converting physical forms into analytical ones in the Revit software package. *New information technologies in architecture and construction: materials of the VI International scientific and practical conference*. Ekaterinburg: USAU named after N.S. Alferova, 2023:69. EDN: IBWQBG. (In Russ)
16. Cho J., Kim C., Song Y., Kang J., Yeon J. Lumped record management method using BIM and dynamo for spalling maintenance. *Automation in Construction*. 2024;160:105324. DOI: 10.1016/j.autcon.2024.105324. EDN: JQAQMA.
17. Khan H. Microclimatic architectural design by interfacing grasshoppers and Dynamo with Rhino and Revit. *Measurement: Sensors*. 2024;33:101143. DOI: 10.1016/j.measen.2024.101143. EDN: EKJQEF.
18. Mikhailov S., Mikhailova A., Nadyrshine N., Nadyrshine L. BIM-technologies and digital modeling in educational architectural design. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 890: 012168. DOI: 10.1088/1757-899X/890/1/012168. EDN: RCNIBS.
19. Merkushev K.A., Shabiev S.G. Problems of digitalization of architectural modeling of industrial facilities. *Architecture, urban planning and design*. 2021; 4 (30): 29–37. EDN: QXSSRE. (In Russ)
20. Aloyan R.M., Fedosov S.V., Oparina L.A. Energy-efficient buildings - status, problems and solutions. Ivanovo: *PresSto*, 2016;276. (In Russ)
21. Onkaev V.A., Serpokrylov N.S., Badrudinova A.N., Dzhalchinova T.B., Kedeeva O.Sh. Influence of climatic conditions on the design and construction of buildings and structures in the Republic of Kalmykia. *Bulletin of Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering*. 2022;24(2):95–105. DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-2-95-105. EDN: FOXBBG. (In Russ)
22. Azhar S., Carlton W.A., Olsen D., Ahmad I. Building information modeling for sustainable design and LEED rating analysis. *Automation in Construction*. 2011;20(2):17–224. DOI: 10.1016/j.autcon.2010.09.019. (In Russ)
23. Ginzburg A.V. BIM technologies throughout the life cycle of a construction project. *Information resources of Russia*. 2016; 5(153): 28–31. EDN: WTQPPH. (In Russ)
24. Tselishcheva V.K., Yakubova A.Sh., Sukhanov K.O. Using energy modeling to improve building energy efficiency. BIM modeling in construction and architecture: Proc. of the VI International scientific and practical conference. Under the general editorship of ed. A. A. Semenov. SPb.: SPbGASU, 2023;395–401. DOI: 10.23968/BIMAC.2023.055. EDN: FZXHFG. (In Russ)
25. Ilyukhina E.A., Lakhman S.I., Miller A.B., Travush V.I. Structural solutions for the Lakhta Center high-rise building in St. Petersburg. *Academia. Architecture and Construction*. 2019;3:110–121. DOI: 10.22337/2077-9038-2019-3-110-121. EDN: MLORRC. (In Russ)
26. URL: <https://1build.ru/technologies/lahta-czentr/> (дата обращения: 08.06.2024) (In Russ)
27. URL: <https://lenta.ru/articles/2016/06/29/zamki/> (дата обращения: 08.06.2024) (In Russ)

Сведения об авторах:

Деваража Малавараге Навинду Сачинтха, аспирант кафедры информационных систем и технологий; dmns94@gmail.com

Семенов Алексей Александрович, доктор технических наук, профессор кафедры информационных систем и технологий; sw.semenov@gmail.com

Information about authors:

Malavarage N.S. Dewaraja, Post-graduate Student, Department of Information Systems and Technologies; dmns94@gmail.com

Alexey A. Semenov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Department of Information Systems and Technologies; sw.semenov@gmail.com.

Конфликт интересов/Conflict of interest.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов/The authors declare no conflict of interest.
Поступила в редакцию/ Received 04.10.2024.

Одобрена после рецензирования / Reviced 27.11.2024.

Принята в печать /Accepted for publication 11.01.2025.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК [343.98:004.056] + 159.923 + 519.25
DOI: 10.21822/2073-6185-2025-52-1-87-96



Оригинальная статья / Original article

**Математическая модель определения степени склонности
к подверженности киберпреступлению**

И.В. Карпасюк, А.И. Карпасюк

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

Резюме. Цель. Целью исследования является построение математической модели определения взаимосвязи кибервиктимности с чертами характера, присущими жертвам кибермошенничества. Описаны особенности современного кибермошенничества, базирующегося в первую очередь на психологических аспектах влияния на жертву. **Метод.** Исследование основано на статистических методах, связанных с определением взаимосвязи степени подверженности киберпреступлениям с уровнем проявления черт характера жертв, выявленных в виде соответствующих количественных характеристик по тесту Кеттеля. **Результат.** Продемонстрирован способ определения коэффициентов, задающих относительные веса для степени проявления этих факторов в задаче выявления подверженности определенному киберпреступлению. Предложена математическая модель, которая позволяет оценить уровень кибервиктимности некоторого респондента по отношению к конкретному киберпреступлению в зависимости от величины числовых значений, описывающих его личностные характеристики, подвергаемые изучению с помощью теста Кеттеля. В рамках данной модели вводится числовой показатель, определяющий критерий степени подверженности респондента рассматриваемому киберпреступлению. Проведены расчеты уровня кибервиктимности в разрезе таких видов кибермошенничества, как фишинг, вишинг, мошенничество в сфере онлайн-покупок, для респондентов, которых можно отнести к жертве и к резистенту соответствующих киберпреступлений по совокупности личностных характеристик. **Вывод.** По результатам проведенных расчетов продемонстрировано соответствие полученных числовых характеристик, описывающих уровень кибервиктимности респондента, его качественной принадлежности к числу жертв или резистентов по каждому из видов кибермошенничества.

Ключевые слова: кибермошенничество, кибервиктимность, фишинг, вишинг, стены, тест Кеттеля, черты характера, жертва, степень подверженности киберпреступлению

Для цитирования: И.В. Карпасюк, А.И. Карпасюк. Математическая модель определения степени склонности к подверженности киберпреступлению. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025; 52(1):87-96.
DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-1-87-96

**Mathematical Model for Determining the Degree of Propensity
to Be Exposed to Cybercrime**
I.V. Karpasyuk, A.I. Karpasyuk
Astrakhan State Technical University,
16 Tatishcheva St., Astrakhan 414056, Russia

Abstract. Objective. The aim of the study is to develop a mathematical model for determining the relationship between cyber victimhood and the character traits inherent in victims of cyber fraud. The article describes the features of cyber fraud based on the psychological aspects of influence on the victim. **Method.** The study is based on statistical methods related to determining the relationship between the degree of susceptibility to cyber crimes and the level of

manifestation of the character traits of victims identified in the form of corresponding quantitative characteristics according to the Cattell test. **Result.** A method is proposed for determining the coefficients that set the relative weights for the degree of manifestation of factors in the task of identifying susceptibility to a particular cyber crime. A mathematical model is proposed for assessing the level of cyber victimhood of a respondent in relation to a specific cyber crime depending on the magnitude of numerical values describing the personal characteristics studied using the Cattell test. The model introduces a numerical indicator that determines the criterion for the degree of susceptibility of the respondent to the cyber crime in question. Based on statistical data, the level of cyber victimization was calculated in terms of types of cyber fraud, such as phishing, vishing, online shopping fraud, for respondents who can be classified as victims and resistors of the relevant cyber crimes based on a set of personal characteristics. **Conclusion.** The correspondence of the obtained numerical characteristics describing the level of cyber victimization of the respondent, his qualitative belonging to the number of victims or resistors for each type of cyber fraud was demonstrated.

Keywords: cyber fraud, cybervictimization, phishing, vishing, stens, Kettell test, character traits, victim, degree of exposure to cybercrime.

For citation: I.V. Karpasyuk, A.I. Karpasyuk. Mathematical Model for Determining the Degree of Propensity to be Exposed to Cybercrime. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2025; 52(1):87-96. (In Russ). DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-1-87-96

Введение. В настоящее время наблюдается значительный рост количества киберугроз [1, 2]. В 2024 году количество преступлений, совершенных в РФ с использованием информационно-телекоммуникационных технологий, увеличилось на 16,4% по сравнению с 2023 годом, их удельный вес в общем числе зарегистрированных преступлений составил 39,2% [3]. Большая часть таких преступлений совершается путем мошенничества. В современной России мошенничество — одно из самых часто совершаемых преступлений, а среди видов мошенничества лидирующие позиции занимают телефонное и Интернет-мошенничество. При этом раскрываемость таких преступлений составляет не более 23% [4]. Киберпреступность носит интеллектуально-информационный характер, используя как техническую, так и социально-психологическую составляющие актов правонарушений в виртуальной среде. Взаимодействие сторон киберпреступления - правонарушителя и жертвы - может проявляться в разных видах и характеризоваться как наличием двух одушевленных оппонентов, так и воздействием на жертву достаточно автономного вредоносного программного продукта [5].

Наиболее распространенными, постоянно видоизменяющимися и совершенствующимися формами психологического воздействия на сознание и поведение людей в рамках явления киберпреступности являются многочисленные схемы кибермошенничества, успех применения которых зависит от различных способов маскировки вредоносных воздействий. Практически беспрогрышной стратегией воздействия на сознание и волю человека является формирование условий и обстоятельств, приводящих к погружению жертвы в информационно-психологическое пространство, способствующее принятию с ее стороны определенных решений, которые максимально эффективно приведут к конкретному результату, необходимому преступнику. Совокупность приемов, методов и технологий создания такого пространства описывается понятием «социальная инженерия» [6-8].

Все техники информационно-психологического воздействия на жертву с целью вынуждения совершения определенных действий основаны на когнитивных искажениях [9]. Искаженное видение объективной реальности способствует снижению внимательности и адекватного восприятия истинных мотивов киберпреступников. Именно этими психологическими особенностями жертвы пользуются мошенники, применяя обман как информационное, интеллектуальное воздействие одного человека на сознание и волю

другого [10]. Практически во всех типах мошеннических схем, реализуемых в киберпространстве, задействованы психологические приемы и методы, что значительно увеличивает эффективность этих схем. Различные способы использования социальной инженерии при проведении кибератак укладываются в единый шаблон, который описывается схемой Шейнова [6, 10, 11]. В рамках данной схемы, на этапах сбора информации о жертве и обнаружения ее уязвимостей основной задачей мошенников при подготовке киберпреступления является исследование психофизических и личностных характеристик объекта воздействия с целью выбора наиболее подходящего способа такого воздействия, который может привести к поставленной цели с максимальными шансами на успех и минимальными рисками и затратами.

Существует множество исследований, посвященных изучению характеристик личности кибержертв (субъектов, подверженных воздействию киберпреступников) и феномена кибервиктимности (склонности к подобным воздействиям) [12-16]. Установлено, что жертвы киберпреступлений характеризуются выраженностью определенных черт характера [17, 18]. Для жертв разных видов киберпреступлений набор подобных черт характера может отличаться [19]. Однако, большинство работ связано с выявлением качественной взаимосвязи личностных характеристик жертв с их подверженностью определенным видам киберпреступлений. В работах [20, 21] проведена количественная оценка различий в уровнях проявления черт характера жертв кибемошенничества и лиц, сумевших противостоять преступному воздействию (рэзистентов), и выявлены наборы черт характера с наибольшей асимптотической значимостью таких различий, определяющих личностный профиль жертв, в том числе в разрезе различных видов кибемошенничества. Расчеты проводились на основе статистических данных, содержащих целочисленные значения (так называемые стены), описывающие по десятибалльной шкале степень выраженности черт характера (первичных факторов) жертв и рэзистентов, которые были получены в рамках тестирования респондентов с помощью теста Кеттеля [22, 23].

Постановка задачи. В работе [21] построена матрица S , описывающая взаимосвязь между 16-ю чертами характера и рассмотренными видами кибемошенничества: P_1 - фишинг, P_2 - вишинг, P_3 - мошенничество в сфере онлайн-покупок. Матрица S демонстрирует, какие типичные черты характера свойственны людям, наиболее подверженным воздействию указанных кибератак. Однако, она показывает только качественную картину подобных взаимосвязей. Определим количественные характеристики параметров, описывающих влияние соответствующих первичных факторов на степень склонности к тому, чтобы стать жертвой того или иного киберпреступления.

Методы исследования. Построение математической модели зависимости уровня кибервиктимности от степени проявления черт характера жертвы проведем на примере некоторого вида кибемошенничества P^* .

Определение весовых коэффициентов для значимых черт характера. Пусть кибемошенничеству P^* соответствует множество черт характера C_t , $t = 1, \dots, T$, оказывающих преобладающее воздействие на склонность к подверженности данному кибемошенничеству, полученное после редукции числа первичных факторов теста Кеттеля и выделения наиболее значимых из них (см. [21]). Для разных видов кибемошенничества значения T могут быть различны.

Составим вектор $\nu = (\nu_1, \dots, \nu_T)$, элементы которого ν_t равны средним значениям стенов жертв преступления P^* по черте характера C_t . Аналогичный вектор $\rho = (\rho_1, \dots, \rho_T)$ составим из средних значений ρ_t стенов рэзистентов преступления P^* по тем же чертам характера C_t . По построению, значения элементов векторов ν и ρ принадлежат отрезку [1, 10]. Найдем вектор $\Delta = (\Delta_1, \dots, \Delta_T)$ по формуле

$$\Delta = \nu - \rho. \quad (1)$$

Большему абсолютному значению элемента Δ_t данного вектора будет соответствовать большее влияние черты характера C_t на склонность к подверженности преступлению

P^* . Знак элемента Δ_t показывает характер такого влияния: отрицательное значение Δ_t означает, что на усиление подверженности преступлению P^* влияет уменьшение значений стенов, описывающих черту характера C_t , тогда как положительное значение Δ_t свидетельствует об усилении подверженности преступлению P^* при увеличении значений этих стенов. Следует отметить, что элементы Δ_t не могут быть нулевыми в силу того, что чертам характера C_t соответствуют наиболее значимые различия соответствующих стенов жертв и резистентов. Степень доминирования одних черт характера над другими при определении их влияния на подверженность преступлению P^* опишем с помощью весовых коэффициентов w_t :

$$w_t = \frac{|\Delta_t|}{\sum_{j=1}^T |\Delta_j|}, \quad t = 1, \dots, T. \quad (2)$$

По построению $\sum_{t=1}^T w_t = 1$. Таким образом, нормированные показатели w_t принимают значения на интервале $(0, 1)$ (при $T > 1$) и описывают относительные веса влияния черт характера C_t на подверженность киберпреступлению P^* .

Построение математической модели определения степени подверженности киберпреступлению. Найденные весовые коэффициенты w_t можно применить для определения степени угрозы стать жертвой киберпреступления P^* для любого респондента, прошедшего анкетирование по 16-факторному личностному опроснику Кеттеля и имеющего значения стенов для всех факторов. При этом в расчет будут браться только значения стенов по чертам характера C_t , $t = 1, \dots, T$, соответствующим данному преступлению P^* .

Пусть известен набор целочисленных значений стенов для каждой из 16-ти черт характера некоторого произвольного респондента Θ , определенных с помощью теста Кеттеля и принадлежащих отрезку $[1, 10]$. Из данного набора выберем стены, соответствующие чертам характера C_t для преступления P^* , и составим из них вектор $\mathbf{r} = (r_1, \dots, r_T)$. Степень выраженности черты характера C_t респондента Θ относительно склонности к тому, чтобы стать жертвой киберпреступления P^* , обозначим δ_t . Будем считать, что $\delta_t \in [0, 1]$, и значению $r_t = \rho_t$, описывающему характерные значения стенов резистентов, соответствует минимальное значение $\delta_t = 0$, а значению $r_t = \nu_t$, описывающему характерные значения стенов жертв, соответствует максимальное значение $\delta_t = 1$. Зависимость δ_t от r_t будем предполагать линейной.

Примем во внимание, что если для черты характера C_t величина $\Delta_t > 0$ (что соответствует случаю $\nu_t > \rho_t$), а для соответствующего стена r_t респондента Θ выполняется условие $r_t < \rho_t$, то черта характера C_t никак не влияет на подверженность респондента Θ преступлению P^* , и наоборот, при выполнении условия $r_t > \nu_t$ влияние черты характера C_t респондента Θ на подверженность этому преступлению не вызывает сомнений.

Аналогично, если величина $\Delta_t < 0$ ($\nu_t < \rho_t$) и $r_t > \rho_t$, то влияние черты характера C_t на преступление P^* у респондента Θ не проявляется, а если $r_t < \nu_t$, то такое влияние бесспорно.

Построим функции, позволяющие определять значение показателя δ_t по значению r_t в соответствии с приведенным выше описанием.

Случай $\Delta_t > 0$ означает, что при увеличении значений стенов $r_t \in [\rho_t, \nu_t]$ кибервиктимность по преступлению P^* будет линейно возрастать от 0 до 1, для значений $r_t < \rho_t$ величина показателя δ_t будет равна нулю, а для значений $r_t > \nu_t$ показатель $\delta_t = 1$. Найдем уравнение прямой $y(x)$, проходящей через точки $(\rho_t, 0)$ и $(\nu_t, 1)$:

$$y = \frac{x - \rho_t}{\nu_t - \rho_t}. \quad (3)$$

Тогда функция $f(x)$, описывающая изменения показателя δ_t в случае, когда $\Delta_t > 0$, с учетом формулы (3) будет иметь вид:

$$f(x) = \begin{cases} 0, & x < \rho_t, \\ \frac{x - \rho_t}{v_t - \rho_t}, & x \in [\rho_t, v_t], \\ 1, & x > v_t. \end{cases} \quad (4)$$

Проведем аналогичные построения для случая $\Delta_t < 0$, когда с увеличением значений стенов r_t на отрезке $[v_t, \rho_t]$ значения δ_t будут линейно уменьшаться от 1 до 0, для значений $r_t < v_t$ величина показателя δ_t будет равна 1, а для значений $r_t > \rho_t$ значения δ_t будут равны нулю. Тогда уравнение соответствующей линейной функции примет вид:

$$y = 1 - \frac{x - v_t}{\rho_t - v_t}. \quad (5)$$

Используя формулу (5), построим функцию $g(x)$, описывающую изменения показателя δ_t в случае, когда $\Delta_t < 0$:

$$g(x) = \begin{cases} 1, & x < v_t, \\ 1 - \frac{x - v_t}{\rho_t - v_t}, & x \in [v_t, \rho_t], \\ 0, & x > \rho_t. \end{cases} \quad (6)$$

Кусочно-линейные функции $f(x)$ и $g(x)$ позволяют вычислить уровень подверженности некоторого респондента Θ киберпреступлению P^* по значениям стенов этого респондента в зависимости от того, увеличением или уменьшением значений стенов характеризуется подобная подверженность, что определяется знаком соответствующих элементов вектора Δ . Тогда формула, описывающая зависимость относительных значений такой выраженности δ_t от значений стенов r_t для соответствующих черт характера C_t произвольного респондента Θ , имеет вид:

$$\delta_t(r_t) = \begin{cases} f(r_t), & \Delta_t > 0, \\ g(r_t), & \Delta_t < 0, \end{cases} \quad t = 1, \dots, T, \quad (7)$$

где Δ_t — элемент вектора Δ , задаваемого формулой (1), а функции f и g определяются формулами (4) и (6) соответственно.

Для удобства восприятия и в целях представления входных и выходных данных в одини единицах измерения, масштабируем значения $\delta_t \in [0, 1]$ так, чтобы они принимали целые значения на отрезке $[1, 10]$. Воспользуемся известной формулой для перехода от величины $x \in [\alpha, \beta]$ к пропорциональной ей величине $y \in [a, b]$:

$$y = a + (b - a) \cdot \frac{x - \alpha}{\beta - \alpha}. \quad (8)$$

В нашем случае $\alpha = 0$, $\beta = 1$, $a = 1$, $b = 10$, отсюда

$$\delta_t^* = [1 + 9\delta_t], \quad t = 1, \dots, T, \quad (9)$$

где функция $[x]$ округляет элемент x до ближайшего целого числа по правилам математического округления. Таким образом, вектор $\delta^* = (\delta_1^*, \dots, \delta_T^*)$ будет представлять собой аналог набора стенов теста Кеттела, описывающих степень проявления черт характера числами от 1 до 10, но предназначенный для характеристики степени влияния черт характера C_t респондента Θ на его подверженность преступлению P^* . При этом так же, как и в тесте Кеттела, значение $\delta_t^* = 1$ означает минимальный уровень влияния, значение $\delta_t^* = 10$ — максимальный уровень влияния. Расчет показателя (критерия) CV степени подверженности респондента Θ преступлению P^* проведем с помощью аддитивной свертки [24] по формуле

$$CV = \sum_{t=1}^T w_t \cdot \delta_t, \quad (10)$$

представляющей собой скалярное произведение векторов $\mathbf{w} = (w_1, \dots, w_T)$ и $\delta = (\delta_1, \dots, \delta_T)$, элементы которых вычисляют по формулам (2) и (7) соответственно. Критерий CV принимает значения на отрезке $[0, 1]$.

Если $CV = 0$, то это означает отсутствие основания для признания респондента Θ потенциальной жертвой киберпреступления P^* . Если же $CV = 1$, то респондента Θ с уверенностью можно отнести к числу потенциальных кибержертв преступления P^* .

Обсуждение результатов. Применим разработанную математическую модель для расчета весовых коэффициентов черт характера и проведения с их помощью оценок склонности к кибервиктимности для разных видов киберпреступлений.

В соответствии с данными, приведенными в работе [21], на склонность к тому, чтобы стать жертвой кибемошенничества P_1 (фишинга), указывают низкие значения степеней для черт характера C_3 (эмоциональная стабильность), C_4 (уровень доминантности) и C_{15} (самоконтроль), то есть количество значимых признаков в этом случае $T = 3$.

Векторы ν и ρ , элементами которых являются средние стены жертв и резистентов преступления P_1 соответственно, вычисленные по полученным исходным данным анкетирования респондентов для черт характера C_3, C_4, C_{15} , имеют вид: $\nu = (2.784, 3.576, 3.261)$, $\rho = (6.928, 7.552, 8.103)$. Тогда вектор Δ , вычисленный по формуле (1), имеет координаты $\Delta = (-4.144, -3.976, -4.842)$. Вычислим весовые коэффициенты по формуле (2), получим: $w = (0.320, 0.307, 0.374)$. В данном случае, для всех элементов вектора Δ выполняется условие

$$\Delta_t < 0, \quad t = 1, \dots, T. \quad (11)$$

Проведем демонстрацию процесса моделирования по построенной модели выявления склонности к подверженности киберпреступлению на примере гипотетических значений степеней по показателям теста Кеттеля для абстрактного респондента Θ , которые будут близки к средним значениям степеней жертв по каждому из рассматриваемых видов кибемошенничества, то есть личностные характеристики этого респондента должны свидетельствовать о том, что он является скорее жертвой, чем резистентом.

Пусть для респондента Θ вектор r значений степеней для черт характера C_3, C_4, C_{15} , определяющих возможную склонность к фишингу P_1 , имеет вид $r = (3, 3, 4)$. В силу условия (11), значения параметров δ_t , вычисляемые по формуле (7) и характеризующие степень влияния черт характера респондента Θ на его подверженность данному преступлению, будут представлять собой значения функции $g(x)$, описываемой формулой (6). Найдя эти значения, получим вектор $\delta = (0.948, 1, 0.847)$. Тогда вектор $\delta^* = (10, 10, 9)$, его элементы найдены по формуле (9). Таким образом, степень влияния черт характера респондента Θ на подверженность фишингу очень высоки. Далее найдем величину критерия CV_1 степени подверженности респондента Θ фишингу P_1 по формуле (10), получим: $CV_1 = 0.926$. Аналогичные расчеты проведем для остальных рассмотренных в работе [21] видов кибемошенничества — P_2 (вишинг) и P_3 (мошенничество в сфере онлайн-покупок), результаты представим в виде таблиц 1 и 2 соответственно.

Таблица 1. Вычисление критерия CV_2 для вишинга

Table 1. Calculating the CV_2 criterion for vishing

Исходные данные для преступления P_2 (вишинг) Initial data for the crime
$T = 4: C_3, C_9, C_{12}, C_{16}$ $\nu = (3.046, 3.350, 8.362, 7.935)$ $\rho = (7.329, 8.474, 2.991, 3.108)$
Вычисление весовых коэффициентов w Calculation of weighting coefficients
$\Delta = (-4.283, -5.124, 5.371, 4.827)$ $w = (0.218, 0.261, 0.274, 0.246)$
Вычисление критерия CV_2 Calculation of the criterion
$r = (3, 4, 7, 6)$ $\delta = (1, 0.873, 0.746, 0.599)$ $\delta^* = (10, 9, 8, 6)$ $CV_2 = 0.799$

Таким образом, для респондента Θ , стены которого близки к средним значениям степеней жертв по каждому из рассмотренных видов кибемошенничества, показатели степени его подверженности данным киберпреступлениям достаточно близки к единице,

что свидетельствует о высоком уровне потенциальной кибервиктимности этого респондента по отношению к данным угрозам.

Таблица 2. Вычисление критерия CV_3 для мошенничества в сфере онлайн-покупок
Table 2. Calculating the CV_3 criterion for fraud in online shopping

Исходные данные для преступления P_3 (мошенничество в сфере онлайн-покупок) Initial data for the crime
$T = 3: C_5, C_{11}, C_{15}$ $v = (7.194, 2.605, 3.088)$ $\rho = (3.523, 6.871, 7.549)$
Вычисление весовых коэффициентов w Calculation of weighting coefficients
$\Delta = (3.671, -4.266, -4.461)$ $w = (0.296, 0.344, 0.360)$
Вычисление критерия CV_3 Calculation of the criterion
$r = (7, 3, 4)$ $\delta = (0.947, 0.907, 0.796)$ $\delta^* = (10, 9, 8)$ $CV_3 = 0.879$

По аналогичной схеме выполним расчет критериев CV_1 , CV_2 , CV_3 для респондента Θ , стены которого будут близки к средним значениям стенов резистентов по этим же видам кибермошенничества. Результаты оформим в виде таблицы 3.

Таблица 3. Вычисление критериев CV_1 , CV_2 , CV_3 для респондента — резистента
Table 3. Calculating criteria CV_1 , CV_2 , CV_3 for the resistant respondent

Преступление P_1 (фишинг) Crime phishing
$T = 3: C_3, C_4, C_{15}$ $v = (2.784, 3.576, 3.261)$ $\rho = (6.928, 7.552, 8.103)$ $\Delta = (-4.144, -3.976, -4.842)$ $w = (0.320, 0.307, 0.374)$ $r = (6, 7, 8)$ $\delta = (0.224, 0.169, 0.021)$ $\delta^* = (3, 2, 1)$ $CV_1 = 0.122$
Преступление P_2 (вишинг) Crime vishing
$T = 4: C_3, C_9, C_{12}, C_{16}$ $v = (3.046, 3.350, 8.362, 7.935)$ $\rho = (7.329, 8.474, 2.991, 3.108)$ $\Delta = (-4.283, -5.124, 5.371, 4.827)$ $w = (0.218, 0.261, 0.274, 0.246)$ $r = (6, 6, 3, 4)$ $\delta = (0.31, 0.483, 0.001, 0.185)$ $\delta^* = (4, 5, 1, 3)$ $CV_2 = 0.24$
Преступление P_3 (мошенничество в сфере онлайн-покупок) Crime online shopping fraud
$T = 3: C_5, C_{11}, C_{15}$ $v = (7.194, 2.605, 3.088)$ $\rho = (3.523, 6.871, 7.549)$ $\Delta = (3.671, -4.266, -4.461)$ $w = (0.296, 0.344, 0.360)$ $r = (4, 5, 8)$ $\delta = (0.130, 0.439, 0)$ $\delta^* = (2, 5, 1)$ $CV_3 = 0.189$

Из приведенных в табл. 3 результатов расчета следует, что для респондента Θ , стены которого близки к средним значениям стенов резистентов соответствующих преступлений, критерии CV_1 , CV_2 , CV_3 достаточно близки к нулю, что подразумевает низкую кибервиктимность респондента. Таким образом, результаты моделирования демонстрируют соответствие рассчитанных показателей ожидаемым результатам, что подтверждает работоспособность модели.

Вывод. Разработанная математическая модель определения степени склонности к подверженности определенному киберпреступлению может стать основой для построе-

ния модели выявления общего уровня кибервиктимности респондента для произвольного множества рассматриваемых киберпреступлений по совокупности числовых показателей его черт характера, выявленных с помощью теста Кеттеля. Эта модель может быть применена в практической деятельности специалистов, работающих с персоналом, для выявления потенциальных угроз, связанных с кибервиктимным поведением тестируемого контингента.

Библиографический список:

1. Кириленко В.П., Алексеев Г.В. Гармонизация российского уголовного законодательства о противодействии киберпреступности с правовыми стандартами Совета Европы // Всероссийский криминологический журнал. 2020. Т. 14. № 6. С. 898-913. URL: <https://cj.bgu.ru/reader/article.aspx?id=24196> (дата обращения: 28.10.2024).
2. URL: nbpublish.com/e_lr/contents_2020_4.html#32627 (дата обращения: 28.10.2024). Комаров А.А. Исследование по вопросу определения объема генеральной совокупности жертв мошенничества, совершенного посредством глобальной компьютерной сети Интернет //Юридические исследования. 2020. № 4. С. 29-45
3. Состояние преступности в России за январь-август 2024 года. М.: ФКУ «ГИАЦ» МВД РФ. URL: <https://media.mvd.ru/files/application/7206717> (дата обращения: 23.10.2024).
4. Красовская Н.Р., Гуляев А.А. К вопросу о кибермошенничестве // Вестник Удмуртского университета. Социология. Политология. Международные отношения. 2022. №1. С. 133-138. URL: <https://journals.udsu.ru/sociology/article/view/6709> (дата обращения: 28.10.2024).
5. Жмуро Д.В. Модели реализации виктимности в цифровой среде // Защита жертв преступлений в современном обществе: материалы VI Международной научно-практической интернет-конференции (Челябинск, 21–22 февраля 2023 г.). — Челябинск:Эскуэла, 2023. — С. 88-93. URL: <https://victimolog.ru/index.php/PVCMS/article/view/532> (дата обращения: 28.10.2024).
6. Кузнецов М.В., Симдянов И.В.Социальная инженерия и социальные хакеры.- СПб.:БХВ-Петербург, 2007. - 368 с.
7. Грей Дж. Социальная инженерия и этичный хакинг на практике. - М.:ДМК Пресс, 2023. - 226с.
8. Янгаева М.О. Социальная инженерия как способ совершения киберпреступлений // Вестник Сибирского юридического института МВД России. 2021. № 1 (42). С. 133-138. URL: <https://sciup.org/socialnaja-inzhenerija-kak-sposob-sovershenija-kiberprestuplenij-140256700> (дата обращения: 28.10.2024).
9. Мозжухина Ю. Н. Когнитивные искажения как свойство поведенческих моделей // Проблемы педагогики. 2017. № 9 (32). С.22-25. URL: <https://problemopedagogy.ru/images/PDF/2017/32/Problemy-pedagogiki-9-32.pdf> (дата обращения: 28.10.2024).
10. Шейнов В. П. Психология обмана и мошенничества. - М.:АСТ, -Мн.:Харвест, 2010. - 464 с.
11. URL: https://socio.isu.ru/export/sites/socio/ru/media/news/2021/.galleries/docs/_2021-1.pdf (дата обращения: 28.10.2024) Цивелев А.С. Информационная безопасность контрактных систем в сфере закупок//Социальная реальность виртуального пространства. III Междунар. науч.-практ. конф.(Иркутск, 20 сентября 2021 г.):материалы докл. Иркутск:Изд-воИГУ, 2021.- С.274-279.
12. Жмуро Д.В. Кибервиктимизация. Исследовательская матрица // Пролог: журнал о праве. 2021. № 3. С. 109–121. URL: <http://www.prolaw38.ru/kiberviktimizacija-issledovatelskaja-matrica/> (дата обращения: 28.10.2024).
13. URL: https://shelly.kpfu.ru/e-ksu/docs/F_598192770/elibrary_Victimological_features_of_cybercrime.pdf (дата обращения: 28.10.2024).Айнудинова К.А., Айнудинова И.Н. Виктимологические особенности киберпреступности в условиях цифровой трансформации общества//Наука, образование: современные цифровые технологии формирования экосреды инновационного развития региона в условиях системных преобразований: мат-лы национальной научно-практич. конференции в 2-х частях. Часть 1. Казань: Университет управления «ТИСБИ», 2022.- С.34-40.
14. Первушина О.Н., Федоров А.А. Личностные особенности жертв телефонного мошенничества // Вопросы психологии. 2022. Т. 68. № 3. С. 92-103. URL: <http://www.voppsy.ru/cnew22N3.htm> (дата обращения: 28.10.2024).
15. Ildirim E., Çalıcı C., Erdogan B. Psychological Correlates of Cyberbullying and Cyber-Victimization // The International Journal of Human and Behavioral Science. 2017. Vol. 3. № 2. Pp. 7-21. URL: <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/395312> (дата обращения: 28.10.2024).
16. Olenik-Shemesh D., Heiman T., Zuaretz-Hannan M. Cyber-victim1ization among Children: Prevalence, Characteristics, Gender Differences and Links to Social Difficulties // Journal of Child and Adolescent Behavior. 2017. Vol. 5. № 2. 11 p. URL: <https://www.omicsonline.org/open-access-pdfs/cybervictimization->

- among-children-prevalence-characteristics-genderdifferences-and-links-to-social-difficulties-2375-4494-1000339.pdf (дата обращения: 28.10.2024).
17. URL:<https://gpa.cfuv.ru/attachments/article/4051/%D0%92%D1%8B%D0%BF%D1%83%D1%81%D0%BA%2064%20%D1%87%D0%B0%D1%81%D1%82%D1%8D0%B4.pdf> (дата обращения: 28.10.2024). Братусин А.Р., Власенко Е.Е. О характерных индивидуально-типологических особенностях и поведенческих паттернах личности типичных жертв финансового мошенничества // Проблемы современного педагогического образования. 2019. № 64 - 4. С. 292-294.
 18. Дроздикова-Зарипова А.Р., Калацкая Н.Н., Валеева Р.А., Костюнина Н.Ю., Биктагирова Г.Ф. Социально-психологические особенности студентов, склонных к виктимному поведению в интернет-пространстве // Современные научноемкие технологии. 2019. № 12-1. С. 159-166. URL: <https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=37852> (дата обращения: 28.10.2024).
 19. Карпасюк И.В., Карпасюк А.И. Мошенничество в ИБ-сфере и психология жертвы: особенности и взаимосвязи // Защита информации. Инсайд. 2022. № 3(105). С. 41-49. URL: http://www.insidezi.ru/pages/3_2022/41.html (дата обращения: 28.10.2024).
 20. URL: https://psyjournals.ru/journals/psylaw/archive/2022_n2/Vlasova_Buslaeva (дата обращения: 28.10.2024). Власова Н.В., Буслаева Е.Л. Психологические особенности лиц, склонных к кибервиктимному поведению // Психология и право. 2022. Т. 12. № 2. С. 194-206.
 21. Карпасюк И. В., Карпасюк А. И., Давидюк Н.В., Чертина Е.В. Формализация процедуры выявления личностных характеристик потенциальной жертвы кибермошенничества // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2024. № 2. С. 77-84. URL: <https://vestnik.astu.org/ru/nauka/article/82549/view> (дата обращения: 23.10.2024).
 22. Кудинов С.И., Кудинов С.С. Психодиагностика личности: учебн. пособие. — Тольятти: Изд-во ТГУ, 2012. — 270 с.
 23. Акимова М.К., Горбачева Е.И., Зархин В.Г., Козлова В.Т., Ярошевская С.В. Психодиагностика. Теория и практика : учебник для вузов. — М.:Юрайт, 2024. — 609 с.
 24. Минюк С.А., Ровба Е.А., Кузьмич К.К. Математические методы и модели в экономике: Учеб. пособие. -М.: ТетраСистемс, 2002. — 432с.

References:

1. Kirilenko V.P., Alekseev G.V. The Harmonization of Russian Criminal Legislation on Counteracting Cybercrime With the Legal Standards of the Council of Europe. *Russian Journal of Criminology*. 2020; 14(6): 898-913. (In Russ.) URL: <https://cj.bgu.ru/reader/article.aspx?id=24196> (accessed 28.10.2024).
2. URL: nbpublish.com/e_lr/contents_2020_4.html#32627 (accessed 28.10.2024). Komarov A.A. Research on the Question of Determination of the Total Number of Fraud Victims Committed Via Internet. *Legal Research*. 2020; 4:29-45. (In Russ.)
3. The State of Crime in Russia in January-August 2024. FSI «MIAC», Ministry of Internal Affairs, Russia. (In Russ.) URL: <https://media.mvd.ru/files/application/7206717> (accessed 23.10.2024).
4. Krasovskaya N.R., Gulyaev A.A. On the Issue of Cyber Fraud. *Bulletin of Udmurt University. Sociology. Political Science. International Relations*. 2022; 6(1): 133–138. (In Russ.) URL: <https://journals.udsu.ru/sociology/article/view/6709> (accessed 28.10.2024).
5. Zhmurov D. V. Models of Victimhood Implementation in the Digital Environment. / Protection of Victims of Crime in Modern Society (PVCMS 2023), VI International Scientific-Practical Internet-Conference, Chelyabinsk, Russia, February 21-22, 2023, Proceedings, Escuela Chelyabinsk, pp. 88-93. (In Russ.) URL: <https://victimolog.ru/index.php/PVCMS/article/view/532> (accessed 28.10.2024).
6. Kuznetsov M.V., Simdyanov I.V. Social Engineering and Social Hackers. St.Petersburg: BHV- Petersburg, 2007; 368. (In Russ.)
7. Gray J. Practical Social Engineering: A Primer for the Ethical Hacker. M.:DMK-Press, 2023;226. (In Russ.)
8. Yangaeva M.O. Social Engineering as a Way of Committing Cyber Crimes. *Vestnik of Siberian Law Institute of the MIA of Russia*. 2021; 1(42): 133-138. (In Russ.) URL: <https://sciup.org/socialnaja-inzhenerija-kak-sposob-sovershenija-kiberprestuplenij-140256700> (accessed 28.10.2024).
9. Mozzhukhina Yu.N. Cognitive Distortions as a Property of Behavioral Models. *Pedagogical Problems*. 2017; 9(32): 22-25. (In Russ.) URL: <https://problemopedagogy.ru/images/PDF/2017/32/Problemy-pedagogiki-9-32.pdf> (accessed 28.10.2024).
10. Sheynov V.P. The Psychology of Deception and Fraud. M.: AST, Minsk: Harvest, 2010; 464. (In Russ.)
11. URL: https://socio.isu.ru/export/sites/socio/ru/media/news/2021/.galleries/docs/_2021-1.pdf (accessed 28.10.2024) Tsivilev A.S. Information Security of Contract Systems in the Field of Procurement. / Social Reality of Virtual Space, III International Scientific-Practical Conference, Irkutsk, Russia, September 20, 2021, Proceedings, Irkutsk State University Publishing, pp. 274-279. (In Russ.)

12. Zhmurov D.V. Cybervictimization. Research Matrix. *Prologue: Law Journal*. 2021; 3: 109-121. (In Russ.) URL: <http://www.prolaw38.ru/kibervictimizacija-issledovatelskaja-matrica/> (accessed 28.10.2024).
13. URL: https://shelly.kpfu.ru/e-ksu/docs/F_598192770/elibrary_Victimological_features_of_cybercrime.pdf (accessed 28.10.2024). Ainoutdinova K.A., Ainoutdinova I.N. Victimological Features of Cybercrime in the Context of Digital Transformation of Society. / Science, education: modern digital technologies for the formation of the eco-environment of innovative development of the region in the context of system transformations, National Scientific-Practical Conference, Kazan, Russia, 2022, Proceedings in 2 parts, Part 1, Kazan University of Management «TISBI», pp. 34-40. (In Russ.)
14. Pervushina O.N., Fedorov A.A. Personal Characteristics of Vishing Victims. *Voprosy Psichologii*. 2022; 68(3): 92-103. (In Russ.) URL: <http://www.voppsy.ru/cnew22N3.htm> (accessed 28.10.2024).
15. Ildirim E., Çalıcı C., Erdoğan B. Psychological Correlates of Cyberbullying and Cyber-Victimization // *The International Journal of Human and Behavioral Science*. 2017; 3(2): 7-21. URL: <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/395312> (accessed 28.10.2024).
16. Olenik-Shemesh D., Heiman T., Zuaretz-Hannan M. Cyber-Victimization Among Children: Prevalence, Characteristics, Gender Differences and Links to Social Difficulties // *Journal of Child and Adolescent Behavior*. 2017; 5(2): 11 p. URL: <https://www.omicsonline.org/open-access-pdfs/cybervictimization-among-children-prevalence-characteristics-genderdifferences-and-links-to-social-difficulties-2375-4494-1000339.pdf> (accessed 28.10.2024).
17. URL: <https://gpa.cfuv.ru/attachments/article/4051/%D0%92%D1%8B%D0%BF%D1%83%D1%81%D0%BA%2064%20%D1%87%D0%B0%D1%81%D1%82%D1%8C%204,%2%B4.pdf> (accessed 28.10.2024). Bratusin A.R., Vlasenko E.E. On the Characteristic Individual Typological Features and Behavioral Patterns of the Personality of Typical Victims of Financial Fraud. *Problems of Modern Pedagogical Education*. 2019; 64-4: 292-294. (In Russ.)
18. Drozdikova-Zaripova A.R., Kalatskaya N.N., Valeeva R.A., Kostyunina N.Yu., Biktagirova G.F. Socio-Psychological Features of Students Inclined to Victim Behavior in the Internet. *Modern high technologies*. 2019;12-1:159-166 (In Russ.) URL: <https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=37852> (accessed 28.10.2024).
19. Karpasyuk I.V., Karpasyuk A.I. Information Security Fraud and Victim Psychology: Features and Relationships. *Zašita informacii. Inside*. 2022; 3(105): 41-49. (In Russ.) URL: http://www.inside-zi.ru/pages/3_2022/41.html (accessed 28.10.2024).
20. URL: https://psyjournals.ru/journals/psylaw/archive/2022_n2/Vlasova_Buslaeva (accessed 28.10.2024). Vlasova N.V., Buslaeva E.L. Psychological Features of Individuals Prone to Cyber Victimization. *Psychology and Law*. 2022; 12(2): 194-206. (In Russ.)
21. Karpasyuk I.V., Karpasyuk A.I., Davidyuk N.V., Chertina E.V. Formalising the Procedure for Identifying the Personality Characteristics of a Potential Cyber Fraud Victim. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, computer science and informatics*. 2024; 2: 77-84. (In Russ.) URL: <https://vestnik.astu.org/ru/nauka/article/82549/view> (accessed 23.10.2024).
22. Kudinov S.I., Kudinov S.S. Psychodiagnostics of Personality. A Study Guide. Togliatti: Togliatti State University Publishing, 2012; 270. (In Russ.)
23. Akimova M.K., Gorbacheva E.I., Zarkhin V.G., Kozlova V.T., Yaroshevskaya S.V. Psychodiagnostics. Theory and Practice. Textbook for Universities. M.:Urait, 2024; 609. (In Russ.)
24. Minyuk S.A., Rovba E.A. Kuzmich K.K. Mathematical Methods and Models in Economics. A Study Guide. M.:TetraSystems, 2002; 432. (In Russ.)

Сведения об авторах:

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

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

Information about authors:

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

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

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/ Received 04.11.2024.

Одобрена после рецензирования / Reviced 20.12.2024.

Принята в печать /Accepted for publication 11.01.2025.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 004.094



DOI: 10.21822/2073-6185-2025-52-1-97-104 Оригинальная статья /Original article

Оценка рисков утечки персональных данных от атак по каналам поставщиков

И.И. Лившиц

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

Резюме. Цель. Проблема защиты персональных данных (ПДн) продолжает оставаться актуальной даже несмотря на более чем значительное количество нормативной документации, разработанной различными регуляторами. Целью исследования является разработка методов оценки риска утечки персональных данных от атак злоумышленников по каналам поставщиков. **Метод.** В представленной работе исследуется проблема защиты ПДн в информационных системах ВУЗов через сторонние каналы – поставщиков сервисов (supply chain attack), которые, в большинстве случаев, недостаточно изучены экспертами в области информационной безопасности. **Результат.** В отличие от известных «коммерческих» предложений, предусматривающих внедрение новых мер защиты (ограниченных только бюджетом), предлагается применять метод оценки рисков утечки ПДн по всем существующим каналам циркуляции ПДн, а не только для простейшего формализованного выполнения требований владельца ПДн. Акцент представленной работы сделан на обеспечении защиты ПДн для ВУЗов в РФ. Изучены несколько каналов распространения ПДн по основным критическим направлениям (предоставления учебного контента, данных абитуриентов и их представителей, запросов работодателей и пр.). **Вывод.** Представленные результаты могут быть востребованы как в учебном процессе для программ обучения по специальности «Информационная безопасность», так и экспертами, занимающимися практическими аспектами обеспечения защиты ПДн в ВУЗах.

Ключевые слова: персональные данные, ВУЗ, угрозы, риски, утечки, уязвимости, оценка рисков, остаточный риск, атаки по сторонним каналам, сервисы

Для цитирования: И.И. Лившиц. Оценка рисков утечки персональных данных от атак по каналам поставщиков. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025;52(1):97-104. DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-1-97-104

Assessment of the risks of personal data leakage from through supplier channel attacks

I.I. Livshits

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

Abstract. Objective. The problem of personal data (PD) protection continues to be relevant even despite the more than significant amount of regulatory documentation developed by various regulators. The aim of the study is to develop methods for assessing the risk of personal data leakage from malicious attacks through supplier channels. **Method.** The presented paper examines the problem of protecting personal data in information systems of universities through third-party channels – service providers (supply chain attack), which, in most cases, have not been sufficiently studied by experts in the field of IT-security. **Result.** Unlike the well-known "commercial" proposals providing for the introduction of new and new countermeasures (limited only by the budget), it is proposed to apply the method of assessing the risks of PD leakage through all existing PD circulation channels, and not only for the simplest formalized fulfillment of the requirements of the PD owner. The focus of the presented work is on ensuring the protection of PD for Universities in the Russian Federation, accordingly, several channels for the dis-

semination of PD in the main critical areas (provision of educational content, data of applicants and their representatives, requests from employers, etc.) were studied. **Conclusion.** The presented results can be in demand both in the educational process for University programs in the specialty "Information Security", and by experts dealing with practical aspects of ensuring the protection of PD in Universities.

Keywords: personal data, University, threats, risks, leakage, vulnerability, risk assessment, residual risk, attacks through third-party channels, personal data, service

For citation: I.I. Livshits. Assessment of the risks of personal data leakage from through supplier channel attacks. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2025; 52(1):97-104. (In Russ) DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-1-97-104

Введение. Проблема защиты ПДн для ВУЗов не является уникальной, но именно в настоящее время многие эксперты обратили внимание на необходимость обеспечения надлежащей защиты этой ценной категории информации от злоумышленников, готовых похитить и «монетизировать» любые данные. Определенно, ВУЗы, как и многие государственные организации (примем обобщение, поскольку в РФ успешно работает значительное количество и частных и отраслевых ВУЗов), применяют различные средства защиты информации (СЗИ), прошедшие в установленном порядке сертификацию регуляторов (например ФСТЭК или ФСБ). Однако следует признать, что сам факт применения СЗИ не является абсолютной гарантией защиты от утечки ПДн, поскольку существуют уязвимости (в том числе «нулевого дня») технических и программных компонент информационных систем (ИС), внутренние и внешние злоумышленники и пр.

Постановка задачи. В представленной публикации рассмотрен новый подход, учитывающий, что утечки ПДн могут быть не только из «периметра» ВУЗа, но также от третьих лиц, например, поставщиков сервисов для ВУЗов (например, образовательного контента). Необходимо принять во внимание, что собственные ИС поставщиков сервисов могут содержать критические уязвимости. В общем случае, ВУЗ не сможет в силу известных ограничений контролировать надежно все возможные каналы утечки информации, соответственно, невозможно «закрыть» потенциальные уязвимости во многих ИС поставщиков сервисов. Предложено новое архитектурное решение, которое учитывает системное взаимодействие ИТ-инфраструктуры ВУЗов с различными ИС, принадлежащими как государственными органам (министерствам и ведомствам), так и частным компаниям (работодателям, рейтинговым агентствам, поставщикам образовательного контента и пр.)

Методы исследования. Атаки через сторонние каналы (атаки через поставщиков). В настоящее время известно о многих критических инцидентах, связанных с утечкой ПДн крупнейших компаний во всем мире. Проблема утечки ПДн является актуальной практически для всех отраслей, и в настоящее время не предполагается уникальной успешной реализации экономически обоснованной и в тоже время достаточной единой системы мер защиты [21–24]. К сожалению, в равной мере эта проблема затрагивает и бюджетные организации, которые напрямую не имеют дорогостоящих коммерческих данных, но в тоже время не обладают такими же значительными бюджетами на обеспечение ИБ, как промышленные, финансовые или оборонные компании. Следует признать, что интерес к различным категориям ПДн имеет вполне существенный ресурс «монетизации», поскольку стоимость взлома ИТ-инфраструктуры ВУЗа существенно ниже, чем, например, у оборонных предприятий, что позволяет получать доход. Не обязательно атаковать крупные компании, известен пример утечки более 2 млн. личных данных клиентов от простого поставщика офтальмологического ПО [1].

В отчете «2024 Data Breach Investigations Report», представленный компанией Verizon [2], показано (рис. 1), что доля инцидентов и случаев компрометации в отрасли образование (Education) существенно велика и превышает такие отрасли как финансы (Finance) и производство (Manufacturing). Конкретно проблема утечки ПДн актуальна

для ВУЗов во всем мире, например: в Университете Хайфы [3], Манчестера [4] или Швейцарии [5]. Как показывает статистика, существующих мер защиты ПДн (даже таких многостуменчательных, как многофакторная аутентификация [6]) явно недостаточно.

Industry	Incidents				Breaches				Unknown
	Total	Small (1-1,000)	Large (1,000+)	Unknown	Total	Small (1-1,000)	Large (1,000+)	Unknown	
Total	30,458	919	1,298	28,241	10,626	617	986	9,023	
Accommodation (72)	220	16	9	195	106	16	9	81	
Administrative (56)	28	7	7	14	21	6	4	11	
Agriculture (11)	79	5	0	74	56	4	0	52	
Construction (23)	249	17	6	226	220	12	5	203	
Education (61)	1,780	82	630	1,068	1,537	56	618	863	
Entertainment (71)	447	16	2	429	306	10	1	295	
Finance (52)	3,348	75	122	3,151	1,115	54	87	974	
Healthcare (62)	1,378	54	21	1,303	1,220	41	18	1,161	
Information (51)	1,367	79	62	1,226	602	49	19	534	
Management (55)	22	4	1	17	19	4	1	14	
Manufacturing (31-33)	2,305	102	81	2,122	849	62	49	738	
Mining (21)	30	1	2	27	20	1	1	18	
Other Services (81)	462	13	5	444	417	8	5	404	
Professional (54)	2,599	205	102	2,292	1,314	124	73	1,117	
Public Administration (92)	12,217	56	115	12,046	1,085	39	27	1,019	
Real Estate (53)	432	35	5	392	399	29	2	368	
Retail (44-45)	725	90	47	588	369	55	32	282	
Transportation (48-49)	260	21	38	201	138	17	12	109	
Utilities (22)	191	17	11	163	130	12	6	112	
Wholesale Trade (42)	76	22	21	33	54	17	14	23	
Unknown	2,243	2	11	2,230	649	1	3	645	
Total	30,458	919	1,298	28,241	10,626	617	986	9,023	

Рис. 1 – Количество инцидентов и случаев компрометации по отраслям 2024 г.

Fig. 1 – Number of incidents and cases of compromise by industry in 2024.

В экспертном сообществе справедливо полагают важным обратить внимание на риски утечки ПДн через сторонние каналы при атаках «третьих лиц» [7]. В отчетах Forbes [8] отмечается: «... К счастью, существует масса вариантов избежать данного риска, равно как и многих других, которые могут быть обнаружены в процессе оценки рисков третьих сторон». В указанном выше отчете компании Verizon представлен подробный анализ типов угроз, которые были реализованы в рассмотренных случаях компрометации, показано, что почти 15% всех утечек произошли с участием третьих сторон (рис. 2). Существенно и то, что в эту категорию включены и случаи компрометации из-за уязвимостей в ПО, что, к сожалению, в полной мере затрагивает и ИТ-инфраструктуру ВУЗов, не имеющих достаточных ресурсов для создания собственных безопасных программных компонентов.

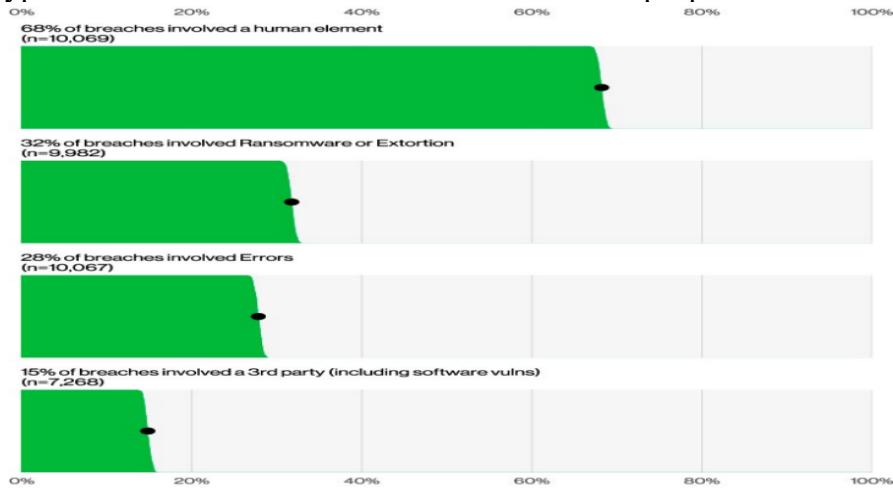


Рис. 2 – Статистика случаев компрометации по типам угроз 2024 г.

Fig. 2 – Statistics of compromise cases by threat type in 2024.

Дополнительно можно отметить еще несколько специфических атак по сторонним каналам, в т.ч. по каналам поставщиков сервисов [9]. В качестве российской аналитической базы следует рассмотреть актуальный отчет (май 2024) «Утечки информации в избранных отраслях, 2021-2023 годы», который представлен Экспертно-Аналитическим центром InfoWatch [10]. Отметим, что в РФ в области защиты ПДн применяется следующая нормативная база, кратко: Федеральные законы (N 152-ФЗ, N 149-ФЗ, N 63-ФЗ и др.),

постановления Правительства (например: N 1119), приказы ФСТЭК (например: N 21, N 235, N 77), приказы ФСБ (например, N 378). Для защиты ПДн персональных многие организации применяют известный европейский стандарт GDPR [25]. Соответственно, с учетом краткого анализа отметим, насколько важно защищать ВУЗы, поскольку они реально оперируют сотнями тысяч записей личных данных самых различных категорий субъектов ПДн (студентов, их законных представителей, работников, рецензентов, научных руководителей, приглашенных экспертов и пр.). При более детальном анализе ситуация выглядит еще более угрожающей, поскольку во многих ВУЗах реализуются программы обучения и академической мобильности для иностранных граждан (студентов, аспирантов и преподавателей).

Обсуждение результатов. В представленной работе предлагается решение поставленной выше проблемы, основываясь на современной риск-ориентированной нормативной базе – ГОСТ Р ИСО/МЭК (ISO/IEC) серии 27005 [11] и ГОСТ Р ИСО/МЭК (ISO/IEC) 31000 [12]. Предлагается формирование численной оценки рисков утечки ПДн в соответствии с известной методикой управления рисками, включающей определение угроз безопасности информации (УБИ), например, на базе доступной базы данных угроз ФСТЭК (БДУ ФСТЭК), установления критерия для принятия рисков, оценка рисков (по показателям вероятности и последствий), выбор мер защиты, оценки результативности мер защиты и оценки остаточных рисков на финальном этапе [26-29].

В табл. 1 представлен фрагмент качественной оценки рисков утечки ПДн, выполненный в 2024 г. в Университете ИТМО в рамках практических работ по курсу «Нормативно-методическое обеспечение информационной безопасности».

Таблица 1. Результаты качественной оценки рисков утечки ПДн для ВУЗа
Table 1. Results of the qualitative assessment of the risks of personal data leakage for the university

Тип угроз	Примеры угроз	Подвержены активы	Риск			Критерий риска	Решение	Остаточный риск			Решение
			В	П	Р			В	П	ОР	
Физические	Воздействие огня, воды	Здания ЦОД Линии связи	Крайне низкая	Критические	Низкий	Средний	Принять	-	-	-	
Окружающая среда	Стихийные бедствия	Здания ЦОД Линии связи	Крайне низкая	Критические	Низкий	Средний	Принять	-	-	-	
Инфраструктура	Нарушение кабельных линий	Здания ЦОД Линии связи	Средняя	Средние	Средний	Средний	Передать (ЦОД)	Низкая	Средние	Низкий	Принять
Технические сбои	Отказ оборудования	Здания ЦОД Линии связи	Низкая	Средние	Низкий	Средний	Принять	-	-	-	
Человеческий фактор	Удаление / кражи данных	Все возможные активы	Средняя	Средние	Средний	Средний	Обработка	Низкая	Средние	Низкий	Принять
Провайдер	Удаление данных	Здания ЦОД Линии связи	Средняя	Средние	Средний	Средний	Передать (ЦОД)	Низкая	Средние	Низкий	Принять

Обозначение: В – вероятность. П – последствия. Р – риск. ОР – остаточный риск. ЦОД – центр обработки данных

Представленный выше пример анализа рисков ПДн включает также и пример обработки рисков с целью формирования оценки «качества» обработки и принятия остаточных рисков. Как показано в примере, в ИТ-инфраструктуре ВУЗа учтены не только «собственные» типы УБИ, но и УБИ по сторонним каналам, например от провайдеров. Этот пример позволяет принять во внимание, что для современного ВУЗа (например, во время приемной компании) обеспечение доступности Web-сайта является исключительно приоритетной задачей. Даже сложно представить совокупность прямых и непрямых (имиджевых) потерь для крупнейших ВУЗов, если в самый разгар приемной кампании сайт будет недоступен несколько часов (дней). На примере простого сервисов СДЭК известны примерные оценки прямых затрат (по данным РБК [13] – около миллиарда руб. в неделю или около 140 млн. руб. в день), не считая возможных исков и репутационных потерь. Соответственно, логичным и абсолютно обоснованным представляется выбор метода обработ-

ки такого риска как «передача», например, надёжному поставщику услуг, имеющему несколько территориально распределенных ЦОД (имеющих необходимые лицензии и сертификаты) и соответствующую репутацию.

Предлагается новая методика, которая учитывает «циркуляцию» ПДн не только в «традиционном» привычном контуре ИТ-инфраструктуры и известных «внутренних» ИС для ВУЗа, но также и для различных схем внешнего взаимодействия, например (рис. 3): поставщики контента; СМИ; работодатели; рейтинговые агентства; рекрутинговые агентства; министерства и ведомства; поставщики сервисов; поставщики средств защиты (он не могут давать абсолютную гарантию надежности своих решений).

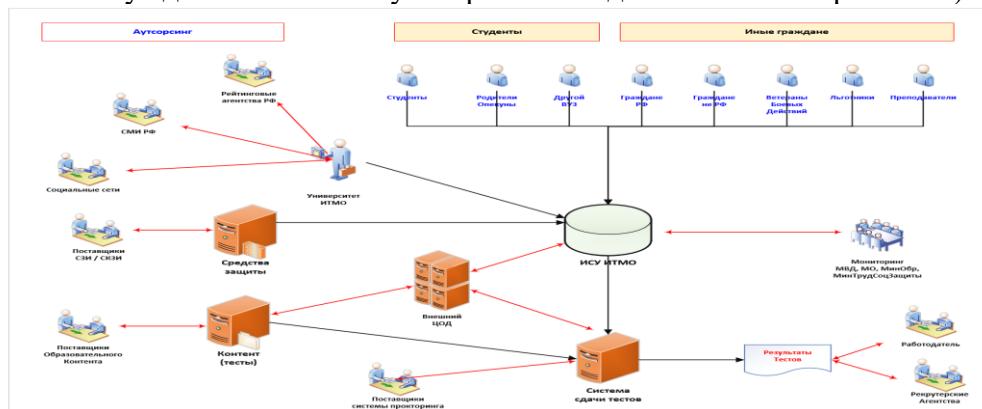


Рис. 3 – Пример ИТ-инфраструктуры Университета ИТМО
Fig. 3 – Example of IT infrastructure of ITMO University

В частности, рассмотрим актуальную информацию компании СКБ «Контур» [14] по возможности организации «бесшовного» взаимодействия между государственными ведомствами и бизнесом. Предполагается, что интеграция ведомственного ЭДО и сервисов для коммерческих систем ЭДО позволит обеспечить безопасный и эффективный обмен документами, поскольку, по информации главы Минцифры России Максута Шадаева, в настоящий момент 20% входящих документов в министерство бизнес подает на бумаге. Важно обратить внимание, что предложенная новая методика учитывает и необходимость защиты функций аутсорсинга (что в настоящее время не учитывается в действующей нормативной базе).

В соответствии с известными стандартами (например, ГОСТ Р ИСО серии 31000 [15] или 27005 [16]), риск определяется как комбинации вероятности и последствий. С учётом требований по защите ПДн в ИТ-инфраструктуре ВУЗа при наличии информационного обмена с ИС третьих сторон, предлагается «базовая» формула оценки риска:

$$R_{\Pi D_H} = \sum_i^n S_i L_i k_i \quad (1)$$

где: S_i – последствия; L_i – вероятность; k_i – коэффициент значимости.

В «базовой» формуле (1) коэффициент k_i нужен для приоритезации конкретного риска с учетом актуальных угроз (таблица 1). С учетом рассматриваемой схемы (рис. 3) введем дополнительное критериальное ограничение R_{Cr} , поскольку идентификация, оценка и анализ всех рисков без исключения не представляется целесообразной по причинам ограничения ресурсов (времени, стоимости и доступных экспертов). При условии учета критериальных значений формула риска принимает вид:

$$R_{\Pi DH} = \sum_i^n S_i L_i k_i \mid R_i \geq R_{Cr} \quad (2)$$

Отметим, что значения риска могут определяться различными объективным методами, например по итогам самооценки собственными экспертными группами, по итогам внешнего аудита или по нормативным требованиям (для государственных информационных систем, например, применим приказ ФСТЭК № 17). Рассмотрим далее сопоставление «базовой» (1) и новой «критериальной» (2) формул для оценки рисков ПДн для

ИТ-инфраструктуры ВУЗа с учётом взаимодействия с ИС третьих сторон. Определим следующие граничные условия (n – количество типов каналов циркуляции ПДн): для «внутренней» модели ($n \leq 5$); для «внешней» модели ($n \geq 15$). Новый расчет рисков ПДн представлен в табл. 2.

Таблица 2. Результаты оценки и обработки рисков утечки ПДн для расширенной модели ВУЗа
Table 2. Results of assessment and processing of risks of personal data leakage for the extended model of the university

Тип модели	N _i	Заинтересованные стороны	Риски	Существующие меры	Оценка риска			Критерий риска	Решение	Дополнительные меры		Остаточный риск			Финальное решение	
					В	П	Р			Технические	Организационные	В	П	Р		
Без учёта взаимодействия с ИС третьих сторон	1	ВУЗ	Инфраструктура	Контракт	Н	Н	Н	Ср	Принять							
	2	Учащиеся	Человеческий фактор	Соглашение ПДн	Н	Ср	Н	Ср	Принять							
	3	Иные граждане	Человеческий фактор	Соглашение ПДн	Н	Ср	Н	Ср	Принять							
	4	Работники	Человеческий фактор	Соглашение ПДн	Ср	Ср	Ср	Ср	Обработка	DLP	Аудиты Соглашения	Н	Ср	Н	Принять	
	5	ФОИВ	Доступность	SLA	Н	Н	Н	Ср	Принять							
С учётом взаимодействия с ИС третьих сторон	1.	ВУЗ	Инфраструктура	Контракт	Н	Н	Н	Ср	Принять							
	2.	Учащиеся	Человеческий фактор	Соглашение ПДн	Н	Ср	Н	Ср	Принять							
	3.	Иные граждане	Человеческий фактор	Соглашение ПДн	Н	Ср	Н	Ср	Принять							
	4.	Работники	Человеческий фактор	Соглашение ПДн	Ср	Ср	Ср	Ср	Обработка	DLP	Аудиты Соглашения	Н	Ср	Н	Принять	
	5.	ФОИВ	Доступность	SLA	Н	Ср	Н	Ср	Принять							
	6.	Провайдеры	Доступность	SLA	Н	В	Ср	Ср	Обработка	Резерв	Аудиты Сертификация	Н	Ср	Н	Принять	
	7.	Внешний ЦОД	Доступность	SLA	Н	В	Ср	Ср	Обработка	Резерв	Аудиты Сертификация	Н	Ср	Н	Принять	
	8.	Поставщик СЗИ	Конфиденциальность	SLA	Н	Ср	Н	Ср	Принять							
	9.	Поставщик контента	Конфиденциальность	SLA	Н	Н	Н	Ср	Принять							
	10.	Прокторинг	Конфиденциальность	SLA	Н	Н	Н	Ср	Принять							
	11.	Социальные сети	Конфиденциальность	Соглашение ПДн	Н	Ср	Н	Ср	Принять							
	12.	СМИ	Конфиденциальность	Соглашение ПДн	Ср	Ср	Ср	Ср	Обработка	DLP	Аудиты Соглашения	Н	Ср	Н	Принять	
	13.	Рейтинговые агентства	Конфиденциальность	Соглашение ПДн	Ср	Н	Н	Ср	Принять							
	14.	Работодатели	Человеческий фактор	Соглашение ПДн	Ср	Н	Н	Ср	Принять							
	15.	Рекрутеры	Человеческий фактор	Соглашение ПДн	Ср	Н	Н	Ср	Принять							

Примечания: 1.Инфраструктура – полная (ИТ, э/э.);2.SLA – Service Level Agreement (соглашение об уровне сервиса);3. ЦОД – центр обработки данных; 4.СЗИ – средство защиты информации; 5.В – вероятность (градации: высокая (В), средняя (Ср), низкая(Н)); 6.П – последствия (градации: высокие (В), средние(Ср), низкие(Н)); 7.Р – значение риска (градации: высокий (В), средний(Ср), низкий(Н)).

Примем во внимание, что установленные граничные условия для новой предложенной модели с учётом взаимодействия с ИС третьих сторон ограничены только информационным взаимодействием, показанным на примере (рис. 3), но известно, что эта модель может быть при необходимости расширена сколь угодно подробно, например, при включении в анализ ИС субподрядчиков. Возможность расширения новой представленной модели можно полагать важным преимуществом. В качестве примеров отметим известные утечки данных специализированных сервисных компаний [17] (в том числе, поставщиков специального ПО [18] и облачных провайдеров [19]).

Предполагается, что включение в новую модель дополнительных вариантов циркуляции ПДн с учётом взаимодействия с ИС третьих сторон позволит более точно описать «ландшафт» УБИ для каждого потенциального источника утечки ПД для конкретного ВУЗа и более эффективно планировать деятельность службы ИБ, в том числе бюджет. Важно, что учитывая итерационный принцип управления рисками ИБ, установленный в указанных выше стандартах, возможно в любой момент пересмотреть как перечень третьих сторон (например, дополнительный ЦОД), так и перечень «наследуемых» рисков с целью более оптимального выбора и применения мер защиты (например, антивирусных систем). Кроме того, ввод нового критериального значения, при котором в новой формуле (2) учитываются только риски, превышающие определенное (пороговое) значение, позво-

ляет перейти к более высокому уровню абстракции – учет риск-аппетита, согласно новейшему ISO/IEC 27005:2022 [20].

Вывод. В представленной работе рассматривается новый метод оценки рисков утечки ПДн по всем существующим каналам циркуляции для ВУЗов в Российской Федерации. В отличие от известных формальных моделей рассматриваются несколько каналов распространения ПДн по основным критическим направлениям (предоставление учебного контента, обработка данных абитуриентов и их представителей, управление запросов работодателей и пр.).

Предложенный новый метод позволяет получить больший охват контроля возможных угроз безопасности информации для информационных систем ВУЗов, в том числе – угроз утечки ПДн по сторонним каналам, что обеспечивает эффективное распределение ресурсов (бюджет, время, персонал). Полученные результаты могут быть применены при реализации проектов защиты ПДН в ВУЗах Российской Федерации, а также в учебном процессе для программ обучения по специальности «Информационная безопасность».

Библиографический список:

1. <https://www.securitylab.ru/news/532395.php>
2. <https://www.verizon.com/business/resources/reports/dbir/>
3. <https://www.securitylab.ru/news/536418.php>
4. <https://www.securitylab.ru/news/539183.php>
5. <https://www.securitylab.ru/news/536310.php>
6. <https://www.securitylab.ru/news/547531.php>
7. <https://www.securitylab.ru/blog/personal/achekanov/92297.php>
8. <https://www.forbes.com/sites/sungardas/2014/09/04/youve-completed-a-vendor-risk-assessment-now-what/>
9. <https://www.tarlogic.com/blog/supply-chain-attacks/>
10. <https://www.infowatch.ru/analytics/analitika/issledovaniye-utechek-informatsii-v-otraslyakh-za-tri-goda>
11. <https://docs.cntd.ru/document/1200084141?ysclid=lwuuccw1n5461596370>
12. <https://docs.cntd.ru/document/1200170125?ysclid=lwuube9s8s433673326>
13. https://www.rbc.ru/technology_and_media/28/05/2024/6655fc979a79477dbc9e33c4?from=from_main_2
14. https://www.cnews.ru/news/line/2024-06-10_glava_mintsifry_rossii_podderzhali
15. <https://internet-law.ru/gosts/gost/73107/?ysclid=ly5sf3zra8363383699>
16. <https://internet-law.ru/gosts/gost/50679/?ysclid=ly5seejcc9653928983>
17. <https://xakep.ru/2024/06/28/au10tix-leak/>
18. <https://www.darkreading.com/cyber-risk/opentext-goes-all-in-on-cybersecurity-size-and-scale-with-micro-focus-purchase>
19. <https://habr.com/ru/articles/825210/>
20. <https://www.iso.org/standard/80585.html>
21. Емельянников М. Защита персональных данных в электронной коммерции//Открытые системы. СУБД. 2011. № 6. С. 30.
22. Тимерханова С.А. Система защиты персональных данных в виртуальной инфраструктуре//Электронные средства и системы управления. Материалы докладов Международной научно-практической конференции. 2018. № 1-2. С. 92-96.
23. Бундин М.В. К вопросу о монетизации персональных данных // В книге: Московский юридический форум онлайн 2020. Сборник тезисов докладов: в 4 частях. Москва, 2020. С. 162-166.
24. Щепетов В.В., Бурденко Е.В. Персональные данные в сети Интернет: общие риски и пути их минимизации // В сборнике: Экономическое развитие в XXI веке: тенденции, вызовы и перспективы. Сборник научных трудов IX Международной научно-практической конференции «Горизонты России» 23 апреля 2021 г.: в 2 ч. Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова. 2021. С. 172-184
25. Орешкина А.С., Лившиц И.И., Соколов Е.О. Правовые проблемы деятельности инспекторов по защите персональных данных: содержание, особенности, специфика для нефтегазовых компаний холдингового типа // Газовая промышленность. 2023. № 4 (847). С. 96-104.
26. Лившиц И.И., Лившиц М.И. Применение национальных стандартов ГОСТ Р и международных стандартов ISO серии 31000 для обеспечения современного уровня менеджмента рисков // Управление финансовыми рисками. 2022. № 4. С. 312-323.

27. Лившиц И.И., Соколов Е.О., Лукьянова А.А. Схемотехнические решения для практической реализации безопасного электронного документооборота. Часть 1. Аналитический обзор. // Газовая промышленность. – 2022. – № 9. – С. 40-56
28. Лившиц И.И., Соколов Е.О., Лукьянова А.А. Схемотехнические решения для практической реализации безопасного электронного документооборота. Часть 2. Новая разработка. // Газовая промышленность. – 2022. – № 11. – С.50-70.
29. Лившиц И.И. Практика управления киберрискаами в нефтегазовых проектах компаний холдингового типа. Вопросы кибербезопасности. – 2020. - №1 (35). – С. 42 – 51.

References:

1. <https://www.securitylab.ru/news/532395.php>
2. <https://www.verizon.com/business/resources/reports/dbir/>
3. <https://www.securitylab.ru/news/536418.php>
4. <https://www.securitylab.ru/news/539183.php>
5. <https://www.securitylab.ru/news/536310.php>
6. <https://www.securitylab.ru/news/547531.php>
7. <https://www.securitylab.ru/blog/personal/achekanov/92297.php>
8. <https://www.forbes.com/sites/sungardas/2014/09/04/youve-completed-a-vendor-risk-assessment-now-what/>
9. <https://www.tarlogic.com/blog/supply-chain-attacks/>
10. <https://www.infowatch.ru/analytics/analitika/issledovaniye-utechek-informatsii-v-otraslyakh-za-tri-goda>
11. <https://docs.cntd.ru/document/1200084141?ysclid=lwuuccw1n5461596370>
12. <https://docs.cntd.ru/document/1200170125?ysclid=lwuube9s8s433673326>
13. https://www.rbc.ru/technology_and_media/28/05/2024/6655fc979a79477dbc9e33c4?from=from_main_2
14. https://www.cnews.ru/news/line/2024-06-10_glava_mintsifry_rossii_podderzhal
15. <https://internet-law.ru/gosts/gost/73107/?ysclid=ly5sf3zra8363383699>
16. <https://internet-law.ru/gosts/gost/50679/?ysclid=ly5seejcc9653928983>
17. <https://xakep.ru/2024/06/28/au10tix-leak/>
18. <https://www.darkreading.com/cyber-risk/opentext-goes-all-in-on-cybersecurity-size-and-scale-with-micro-focus-purchase>
19. <https://habr.com/ru/articles/825210/>
20. <https://www.iso.org/standard/80585.html>
21. Emelyannikov M. Personal data protection in e-commerce. *Open systems. DBMS.* 2011;6:30 (In Russ).
22. Timerkhanova S.A. Personal data protection system in virtual infrastructure. *Electronic means and control systems. Proceedings of the reports of the International scientific and practical conference.* 2018;1-2: 92-96. (In Russ).
23. Bundin M.V. On the issue of monetization of personal data. In the book: Moscow legal forum online 2020. Collection of abstracts of reports: in 4 parts. Moscow, 2020;162-166. (In Russ).
24. Shchepetov V.V., Burdenko E.V. Personal data on the Internet: common risks and ways to minimize them. In the collection: Economic development in the 21st century: trends, challenges and prospects. Collection of scientific papers of the IX International scientific and practical conference "Horizons of Russia" April 23, 2021: in 2 parts. Plekhanov Russian University of Economics. 2021:172-184 (In Russ).
25. Oreshkina A.S., Livshits I.I., Sokolov E.O. Legal problems of the activities of inspectors for the protection personal data: content, features, specifics for oil and gas holding companies. *Gas industry.* 2023: 4 (847): 96-104. (In Russ).
26. Livshits I.I., Livshits M.I. Application of national standards GOST R and international standards ISO 31000 series to ensure a modern level of risk management. *Financial Risk Management.* 2022; 4:312-323. (In Russ).
27. Livshits I.I., Sokolov E.O., Lukyanova A.A. Circuit solutions for the practical implementation of secure electronic document management. Part 1. Analytical review. *Gas industry.* 2022; 9: 40-56 (In Russ).
28. Livshits I.I., Sokolov E.O., Lukyanova A.A. Circuit solutions for the practical implementation of secure electronic document management. Part 2. New development. *Gas industry.* 2022;11: 50-70. (In Russ).
29. Livshits I.I. Practice of cyber risk management in oil and gas projects of holding-type companies. *Cybersecurity issues.* 2020;1 (35):42 - 51. (In Russ).

Сведения об авторе:

Лившиц Илья Иосифович, доктор технических наук, профессор практики, Livshitz.i@yandex.ru

Information about author:

Ilya I. Livshits, Dr. Sci.(Eng.), Prof. of Practice; Livshitz.i@yandex.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/ Received 18.09.2024.

Одобрена после рецензирования/Revised 22.11.2024.

Принята в печать/Accepted for publication 20.01.2025.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 519.852

 (cc) BY 4.0

DOI: 10.21822/2073-6185-2025-52-1-105-112

Оригинальная статья/ Original article

Оценивание параметров линейной регрессии путем минимизации суммы превышений модулей ошибок аппроксимации относительно заданного уровня

С.И. Носков, С.В. Беляев

Иркутский государственный университет путей сообщения,
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15, Россия

Резюме. Цель. Разработка алгоритмического способа оценивания параметров линейной регрессионной модели, основанного на минимизации суммы превышений абсолютных отклонений вычисленных значений зависимой переменной от реальных относительно некоторого наперед заданного уровня. **Методы.** В качестве базового метода идентификации неизвестных параметров регрессионного уравнения используется метод наименьших модулей, основанный на минимизации городского (манхэттенского) расстояния между векторами расчетных и заданных значений зависимой переменной. Реализация метода сводится к задаче линейного программирования. К ней же путем введения некоторых дополнительных ограничений и замены целевой функции сводится задача минимизации суммы превышений абсолютных отклонений вычисленных значений зависимой переменной от реальных относительно некоторого наперед заданного уровня. **Результат.** Построены три альтернативных, с высокой адекватностью, варианта регрессионной однокомпонентной модели развития отрасли промышленности России, занимающейся производством электрооборудования, электронного и оптического оборудования. В качестве независимой переменной использован объем инвестиций в отрасль. **Вывод.** Предложен критерий адекватности регрессионных моделей, который представляет собой модификацию используемой в методе наименьших модулей функции потерь.

Ключевые слова: регрессионная модель, оценивание параметров, метод наименьших модулей, линейное программирование, уровень ошибок, производство электроники

Для цитирования: С.И. Носков, С.В. Беляев. Оценивание параметров линейной регрессии путем минимизации суммы превышений модулей ошибок аппроксимации относительно заданного уровня. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025; 52(1):105-112. DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-1-105-112

Estimation of linear regression parameters by minimizing the sum of the excesses of the approximation error modules relative to a given level

S.I. Noskov, S.V. Belyaev

Irkutsk State Transport University,
15 Chernyshevskogo St., Irkutsk 664074, Russia

Abstract. Objective. Development of an algorithmic method for estimating the parameters of a linear regression model based on minimizing the sum of excesses of absolute deviations of the calculated values of the dependent variable from the real ones relative to some predetermined level. **Methods.** The least absolute values method based on minimizing the city (Manhattan) distance between the vectors of calculated and specified values of the dependent variable is used as a basic method for identifying unknown parameters of the regression equation. Implementation of the method is reduced to a linear programming problem. The problem of minimizing the sum of excesses of absolute deviations of the calculated values of the dependent variable from the real ones relative to some predetermined level is reduced to this problem by introducing some additional constraints and replacing the objective function. **Result.** Three alternative, high-

ly adequate, versions of a regression single-factor model for the development of the Russian industrial sector engaged in the production of electrical, electronic and optical equipment are constructed. The volume of investments in the industry is used as an independent variable. **Conclusion.** A criterion for the adequacy of regression models is proposed, which is a modification of the loss function used in the least absolute value method.

Keywords: regression model, parameter estimation, least absolute values method, linear programming, error level, electronics manufacturing.

For citation: S.I. Noskov, S.V. Belyaev. Estimation of linear regression parameters by minimizing the sum of the excesses of the approximation error modules relative to a given level. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2025;52(1):105-112. (In Russ) DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-1-105-112

Введение. Математическое моделирование, основанное, в частности, на применении методов регрессионного анализа, является весьма действенным инструментом исследования сложных объектов различного характера и масштаба. Обязательным этапом построения регрессионных моделей является их верификация, осуществляемая на основе развитой системы критериев адекватности.

Так, в работе [1] качество множественной регрессионной модели кредитной политики оценивается с помощью устойчивых коэффициентов детерминации и прогнозирования, медианной квадратичной ошибки прогнозирования и эффективности устойчивого моделирования. В [2] представлен подход к проверке адекватности модели интервальной регрессии на основе анализа остатков. Представлены концепции обычного и стандартизированного интервального остатка, а также предложен графический анализ этих остатков. Чтобы показать полезность предлагаемого подхода, выполнено приложение для оценки отсева из школ в бразильских муниципалитетах.

В статье [3] основное внимание уделяется исследованию проверки адекватности модели функциональной линейной квантильной регрессии. Предложена непараметрическая статистика теста U-процесса, основанная на функциональном компонентном анализе. Доказано, что статистика теста асимптотически следует нормальному распределению при нулевой гипотезе и расходится до бесконечности для любых неправильно определенных моделей.

Исследование [4] посвящено нелинейному регрессионному моделированию на основе искусственных нейронных сетей. Применяется процедура анализа сложности и точности модели на основе повторной выборки и теории минимизации структурного риска, а также рассчитывается минимальный размер выборки для пространственных агрегированных данных.

В статье [5] утверждается, что компетентная оценка адекватности многоуровневой регрессионной модели должна содержать как минимум два основных критерия - информационный критерий Акаике и байесовский информационный критерий. В работе [6] оценка влияния коэффициента достаточности капитала на коэффициент банковских резервов, принятых на Тегеранской фондовой бирже, производится на основе регрессионных моделей Кашияпа, Штейна и Левинталя, адекватность которых проверяется по критериям Стьюдента и Фишера.

В статье [7] используется новый индекс делового цикла и адекватная нелинейная панельная модель регрессии плавного перехода на квартальных данных 1538 банковских холдинговых компаний США для изучения реакции коэффициентов достаточности капитала на изменение экономической активности. В [8] изучаются статистические свойства оптимального значения выборочной средней ошибки аппроксимации. Основные результаты касаются функций потерь, траектории которых являются кусочно-непрерывными по Гёльдеру, как, например, в двухэтапных смешанно-целочисленных и классических риск-нейтральных стохастических программах.

Вопросы оценки адекватности регрессионных моделей обсуждаются в работах: [9] (качество регрессионных моделей при изучении металлургических процессов), [10] (регрессионная модель поверхности отклика при анализе несущей способности колесной пары), [11] (регрессионный анализ факторов, влияющих на количество онлайн-курсов в российских университетах), [12] (регрессионное моделирование биохимических процессов), [13] (применение регрессионного анализа для оценки эффективности работы нефтяных скважин), [14] (исследование влияния объема выборки и различных методик определения построчных дисперсий на основные расчетные параметры трехфакторной регрессионной модели при сохранении ее адекватности).

Постановка задачи. Целью настоящей работы является описание критерия оценки адекватности регрессионных моделей, представляющего собой сумму превышений ошибок аппроксимации некоторого заданного уровня, а также сведение задачи оптимизации этого критерия к задаче линейного программирования (ЛП).

Методы исследования. Рассмотрим линейную регрессионную модель (уравнение)

$$y_k = \sum_{i=1}^m \alpha_i x_{ki} + \varepsilon_k, k = \overline{1, n}, \quad (1)$$

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 переменные и ошибки модели (1) детерминированными величинами.

Представим модель (1) 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} .

Таким образом, пара (X, y) представляет собой выборку данных. В том случае, если в модель (1) войдет свободный член, первый столбец матрицы X будет состоять из единиц:

$$x_{k1} = 1, k = \overline{1, n}.$$

Оценивание неизвестных параметров модели (1) производится с помощью одного из значительного количества методов регрессионного анализа (см., например, [15, 16]) путем минимизации выбранной функции потерь. Для одного из наиболее популярных методов – метода наименьших модулей (МНМ), – эта функция имеет вид (в частности, [17]):

$$J_1(\alpha) = \sum_{k=1}^n |\varepsilon_k|. \quad (2)$$

Таким образом, МНМ основан на минимизации городского (манхэттенского) расстояния между векторами расчетных и заданных значений зависимой переменной.

Замечательным свойством МНМ является его выраженная робастность, проявляющаяся в игнорировании выбросов в данных и, как следствие, в равенстве нулю не менее, чем m ошибок аппроксимации (например, [18]).

Реализация метода наименьших модулей сводится к задаче ЛП следующим образом [17]. Введем в рассмотрение неизвестные неотрицательные переменные u_k , v_k , $k = \overline{1, n}$ следующим образом:

$$u_k = \begin{cases} \varepsilon_k, & \varepsilon_k > 0 \\ 0, & \text{в противном случае,} \end{cases}$$
$$v_k = \begin{cases} -\varepsilon_k, & \varepsilon_k < 0 \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Таким образом, u_k и v_k представляют собой соответственно положительные и отрицательные части ошибок ε_k , при этом очевидна справедливость равенств:

$$u_k - v_k = \varepsilon_k, u_k + v_k = |\varepsilon_k|,$$
$$u_k v_k = 0, k = \overline{1, n}. \quad (3)$$

Представим модель (1) в виде системы линейных равенств и условий неотрицательности:

$$\sum_{i=1}^m \alpha_i x_{ki} + u_k - v_k = y_k, k = \overline{1, n}, \quad (4)$$

$$u_k \geq 0, v_k \geq 0, k = \overline{1, n}, \quad (5)$$

Целевая функция задачи ЛП, эквивалентная функции потерь (2), примет вид:

$$\sum_{k=1}^n (u_k + v_k) \rightarrow \min. \quad (6)$$

Для оценки адекватности моделей в регрессионном анализе разработано большое число критериев: ширины области определения уравнения, Фишера, Стьюдента, средней относительной ошибки прогноза, средней относительной ошибки аппроксимации, согласованности поведения расчетных и фактических значений зависимой переменной, смещения, множественной детерминации, информативности набора независимых факторов, дисперсии, Дарбина – Уотсона [17] и другие.

Вместе с тем, основным показателем качества модели следует все-таки считать значение ее функции потерь – в нашем случае $J_1(\alpha)$.

Преобразуем эту функцию, включив в нее превышения модулей ошибок некоторого их наперед заданного уровня δ :

$$\tilde{J}_1(\alpha) = \sum_{k=1}^n g_k, \quad (7)$$

где

$$g_k = \begin{cases} |\varepsilon_k| - \delta, & |\varepsilon_k| > \delta \\ 0, & |\varepsilon_k| \leq \delta. \end{cases}$$

Авторы отдают себе отчет в том, что вне поля их зрения могли оказаться публикации, посвященные некоторым аспектам рассматриваемой в работе задачи.

Введем дополнительные линейные ограничения:

$$u_k + v_k - g_k \leq \delta, k = \overline{1, n}. \quad (8)$$

После этого задача минимизации функции потерь (7) сводится к задаче ЛП с ограничениями (4), (5), (8) и целевой функцией

$$\sum_{k=1}^n g_k + \rho \sum_{k=1}^n (u_k + v_k) \rightarrow \min, \quad (9)$$

где ρ – наперед заданное малое положительное число. Присутствие в (9) второго слагаемого гарантирует выполнение условий (3).

Таким образом, решение задачи ЛП (4), (5), (8), (9) позволяет минимизировать сумму не модулей ошибок аппроксимации, а лишь их превышений по отношению к некоторой заданной величине, что бывает крайне важным при построении реальных регрессионных моделей сложных технических и социально-экономических систем.

Функция (7) может также рассматриваться как еще один важный критерий оценки адекватности этих моделей.

Задача ЛП (4), (5), (8), (9) обладает по крайней мере двумя важными свойствами. Введем некоторые дополнительные обозначения.

Обозначим через $\alpha^{\text{МНМ}}$, $\varepsilon^{\text{МНМ}} = u^{\text{МНМ}} - v^{\text{МНМ}}$ решение задачи ЛП (4) – (6), представляющее собой вектора параметров модели (1) и ее ошибок аппроксимации, вычисленные с помощью МНМ, а через $\alpha(\delta)$ и $\varepsilon(\delta) = u(\delta) - v(\delta)$ – соответствующее решение задачи ЛП (4), (5), (8), (9) при заданном уровне δ .

Нетрудно видеть, что при $\delta=0$ и $\delta \geq \max_{k=1, n} |\varepsilon_k^{\text{МНМ}}|$ справедливы равенства:

$$\alpha^{\text{МНМ}} = \alpha(\delta), \quad u^{\text{МНМ}} = u(\delta), \quad v^{\text{МНМ}} = v(\delta).$$

Другими словами, если в качестве порогового значения ошибки принять ноль или максимальную по модулю ошибку аппроксимации при использовании метода наименьших модулей, то решения задач минимизации функций потерь (2) и (7) приведут к одинаковым оценкам параметров и, как следствие, ошибкам.

Обсуждение результатов. Применим представленный выше способ оценивания параметров регрессионного уравнения (1) при построении модели развития отрасли промышленности России, занимающейся производством электрооборудования, электронного и оптического оборудования. Введем следующие обозначения:

у - объем отгруженных товаров собственного производства, выполненных работ и услуг собственными силами по видам экономической деятельности, млн. руб.;

x – объем инвестиций в основной капитал, млрд. руб.

В качестве информационной базы моделирования используем официальную статистику за 2005 – 2022 гг. (табл. 1) [19-23].

Таблица 1. Исходные данные для моделирования

Table 1. Initial data for modeling

Год	у	x
2005	452288	19.6
2006	600105	22.9
2007	829374	32.6
2008	910352	40.8
2009	816584	34.2
2010	1131549	35.1
2011	1329329	45.1
2012	1481611	59.2
2013	1535828	73.2
2014	1715780	75.3
2015	2206082	102.3
2016	2323341	91.4
2017	2222107	106.3
2018	2358647	107.6
2019	2560783	102.5
2020	2809650	101.3
2021	3060801	146.8
2022	3428981	159.1

Построим модель отрасли в виде:

$$y_k = \alpha_0 + \alpha_1 x_k + \varepsilon_k, k = \overline{1,18}. \quad (10)$$

Вначале при идентификации параметров модели (10) применим обычный метод наименьших квадратов:

$$y_k = 199660 + 20791.9 x_k + \varepsilon_k, k = \overline{1,18}. \quad (11)$$

R=0.953, F=326.9, E=8.83, $J_1 = 2804254.4$.

где R – критерий множественной детерминации, F – критерий Фишера, E – средняя процентная ошибка:

$$E=100\% \sum_{k=1}^{18} |\varepsilon_k| / \sum_{k=1}^{18} y_k.$$

Значения критериев адекватности указывают на весьма высокое качество уравнения (11).

После применения МНМ модель (10) примет вид:

$$y_k = 124472 + 20770 x_k + \varepsilon_k, k = \overline{1,18}, \quad (12)$$

$J_1 = 2452720$, E=7.72.

Рассчитаем для нее вектор ошибок аппроксимации ε :

$$\varepsilon = (-79275.95, 0.00, 27799.86, -61536.26, -18222.17, 278049.82, 268129.67, 127554.47, -109008.74, 27326.23, -43162.17, 300489.99, -110217.22, -678.24, 307384.83, 581175.85, -112708.82, 0.0).$$

В качестве заданного уровня ошибок δ примем среднюю по модулю ошибку:

$$\delta = \sum_{k=1}^{18} |\varepsilon_k| / 18 = 136262.24.$$

Таким образом, для модели (12) $\tilde{J}_1 = 1053921$.

Теперь оценим параметры модели (10) путем решения задачи (ЛП) (4), (5), (8), (9) с $\rho=0.0001$. В результате получим:

$$y_k = 271210 + 19930.9x_k + \varepsilon_k, k = \overline{1,18}, \\ J_1=2814995, E=8.85, \tilde{J}_1 = 835872.7. \quad (13)$$

Таким образом, по точности, в соответствии с критериями Е и J_1 , модели (11) и (13) вполне сопоставимы. Если же сравнивать модели (12) и (13), то окажется, что для второй из них сумма модулей ошибок J_1 больше на 12.8%. Вместе с тем, сумма превышений по отношению к средней ошибке \tilde{J}_1 меньше на 20.7%. Последнее обстоятельство при выборе конкретного варианта модели для последующей практической реализации может оказаться решающим.

Значимость объема инвестиций для производства электрооборудования, электронного и оптического оборудования, характеризуемая коэффициентом α_1 , минимальна для модели (13) и максимальна для модели (11), при этом разница крайне незначительна и составляет всего 4%.

Вывод. В работе поставлена задача разработки алгоритмического способа оценивания параметров линейной регрессионной модели, основанного на минимизации суммы превышений абсолютных отклонений вычисленных значений зависимой переменной от реальных относительно некоторого наперед заданного уровня.

Получены следующие результаты:

1. Разработан критерий оценки точности регрессионных моделей, представляющий собой сумму превышений модулей отклонений расчетных значений зависимой переменной от заданных в выборке относительно некоторого наперед заданного уровня.
2. Оптимизация этого критерия сведена к решению задачи линейного программирования.
3. Построены три варианта регрессионной однофакторной модели развития отрасли промышленности России, занимающейся производством электрооборудования, электронного и оптического оборудования.

Библиографический список:

1. David I.J., Adubisi O.D., Ogbaji O.E., Eghwerido J.T., Umar Z.A. Resistant measures in assessing the adequacy of regression models // Scientific African. 2020. Vol. 8. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00437>.
2. Rafaella L. S. do Nascimento, Roberta A. de A. Fagundes, Renata M. C. R. de Souza & Francisco José A. Cysneiros. Interval regression model adequacy checking and its application to estimate school dropout in Brazilian municipality educational scenario // Pattern Analysis and Applications. 2022. Vol. 26. P. 39–59. <https://doi.org/10.1007/s10044-022-01093-0>.
3. Gongming S., Jiang D., Zhihua S., Zhongzhan Z. Checking the adequacy of functional linear quantile regression model // Journal of Statistical Planning and Inference. 2021. Vol. 210. P. 64-75. <https://doi.org/10.1016/j.jspi.2020.05.003>.
4. Horvath S., Soot M., Zaddach S., Neuner H., Weitkamp A. Deriving adequate sample sizes for ANN-based modelling of real estate valuation tasks by complexity analysis // Land Use Policy. 2021. Vol. 107. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105475>.
5. McCoach D.B., Newton S.D., Gambino A.J. Multilevel Model Selection: Balancing Model Fit and Adequacy. Methodology for Multilevel Modeling in Educational. Singapore: Springer, 2022.
6. Taherinia M., Baqeri A. The Effect of Capital Adequacy Ratio on the Ratio of the Bank Reserves Accepted in the Tehran Stock Exchange // International Journal of Economics and Financial Issues. 2018. Vol. 8, № 1. P. 161-167. <https://www.econjournals.com/index.php/ijefi/article/view/5911>.
7. Rubbaniy G., Khalid A.A., Polyzos S., Almessabi B.N. Cyclicalty of capital adequacy ratios in heterogeneous environment: A nonlinear panel smooth transition regression explanation // Managerial and Decision Economics. 2021. Vol. 43, № 6. P. 1960-1979. <https://doi.org/10.1002/mde.3502>.
8. Krätschmer V. Nonasymptotic Upper Estimates for Errors of the Sample Average Approximation Method to Solve Risk-Averse Stochastic Programs // SIAM Journal on Optimization. 2024. Vol. 34, № 2. P. 1264-1294. <https://doi.org/10.1137/22M1535425>.
9. Алкацев М.И., Алкацев В.М., Абаев З.К., Дзгоев А.Э. Оценка адекватности математических моделей металлургических процессов в рамках регрессионного анализа данных в пакете MathCad //

- Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Металлургия. 2020. Т. 20. № 3. С. 12-20.
10. Кротов С.В., Кротов В.П. Эффективность регрессии поверхности отклика при анализе несущей способности колесной пары вагона // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2010. № 2. С. 143-146.
 11. Кузнецова О.А., Розенцвайг А.И. Регрессионный анализ влияния основных показателей деятельности российских университетов на количество онлайн-курсов // Вестник Московского финансово-юридического университета МФЮА. 2019. № 4. С. 182-188.
 12. Золин П.П., Лебедев В.М., Конвой В.Д. Математическое моделирование биохимических процессов с применением регрессионного анализа Омск: Издательство Омского государственного университета, 2009. 344 с.
 13. Вирстюк А.Ю., Мишина В.С. Применение регрессионного анализа для оценки эффективности работы нефтяных скважин с парафинистой нефтью // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2020. Т. 331. № 1. С. 117-124.
 14. Иванищев Ю.Г., Давыдов В.М., Сарыгин А.В. Сравнительный анализ расчетных параметров регрессионной модели в зависимости от объема выборки и методики расчета дисперсий // Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2022. № 2(65). С. 51-60.
 15. Носков С.И. Способ разрешения альтернативности в оценках параметров регрессионных моделей // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2023. № 4(48). С. 154-162.
 16. Pardoe I. *Applied Regression Modeling*. John Wiley & Sons, Inc., 2021.
 17. Носков С.И. Минимизация средней и максимальной относительных ошибок аппроксимации регрессионной модели // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 1. С. 340-343.
 18. Носков С.И. О кластеризации данных на основе свойств методов идентификации параметров линейной регрессии // Информационные технологии и математическое моделирование в управлении сложными системами. 2022. № 4(16). С. 82-85.
 19. Промышленность России 2010: Стат.сб. М.: Росстат, 2010. 453 с.
 20. Промышленное производство в России. 2016: Стат.сб. М.: Росстат, 2016. 347 с.
 21. Промышленное производство в России. 2019: Стат.сб. М.: Росстат, 2019. 286 с.
 22. Промышленное производство в России. 2023: Стат.сб. М.: Росстат, 2023. 259 с.
 23. Промышленное производство // Росстат. URL: https://rosstat.gov.ru/enterprise_industrial (дата обращения: 18.09.2024).

References:

1. David I.J., Adubisi O.D., Ogbaji O.E., Eghwerido J.T., Umar Z.A. Resistant measures in assessing the adequacy of regression models. *Scientific African*. 2020; 8. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00437>.
2. Rafaela L. S. do Nascimento, Roberta A. de A. Fagundes, Renata M. C. R. de Souza & Francisco José A. Cysneiros. Interval regression model adequacy checking and its application to estimate school dropout in Brazilian municipality educational scenario. *Pattern Analysis and Applications*. 2022; 26: 39-59. <https://doi.org/10.1007/s10044-022-01093-0>.
3. Gongming S., Jiang D., Zhihua S., Zhongzhan Z. Checking the adequacy of functional linear quantile regression model. *Journal of Statistical Planning and Inference*. 2021; 210: 64-75. <https://doi.org/10.1016/j.jspi.2020.05.003>.
4. Horvath S., Soot M., Zaddach S., Neuner H., Weitkamp A. Deriving adequate sample sizes for ANN-based modeling of real estate valuation tasks by complexity analysis. *Land Use Policy*. 2021;107. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105475>.
5. McCoach D. B., Newton S. D., Gambino A. J. *Multilevel Model Selection: Balancing Model Fit and Adequacy*. Methodology for Multilevel Modeling in Educational. Singapore: Springer, 2022.
6. Taherinia M., Baqeri A. The Effect of Capital Adequacy Ratio on the Ratio of the Bank Reserves Accepted in the Tehran Stock Exchange. *International Journal of Economics and Financial Issues*. 2018;8(1):161-167. <https://www.econjournals.com/index.php/ijefi/article/view/5911>.
7. Rubbaniy G., Khalid A.A., Polyzos S., Almessabi B.N. Cyclicalty of capital adequacy ratios in heterogeneous environment: A nonlinear panel smooth transition regression explanation. *Managerial and Decision Economics*. 2021; 43(6): 1960-1979. <https://doi.org/10.1002/mde.3502>.
8. Krätschmer V. Nonasymptotic Upper Estimates for Errors of the Sample Average Approximation Method to Solve Risk-Averse Stochastic Programs. *SIAM Journal on Optimization*. 2024;34(2):1264-1294. <https://doi.org/10.1137/22M1535425>.
9. Alkatsev M.I., Alkatsev V.M., Abaev Z.K., Dzgoev A.E. Evaluation of the adequacy of mathematical models of metallurgical processes within the framework of regression analysis of data in the MathCad package. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Metallurgy*. 2020; 20(3): 12-20. (In Russ.).

10. Krotov S.V., Krotov V.P. Efficiency of response surface regression in analyzing the bearing capacity of a wagon wheel pair. Scientific problems of transport in Siberia and the Far East. 2010; (2): 143-146. (In Russ.).
11. Kuznetsova O.A., Rozenzweig A.I. Regression analysis of the influence of the main performance indicators of Russian universities on the number of online courses. Bulletin of the Moscow Financial and Law University MFUA. 2019; (4): 182-188. (In Russ.).
12. Zolin P.P., Lebedev V.M., Konvay V.D. Mathematical modeling of biochemical processes using regression analysis Omsk: Publishing house of Omsk State University, 2009. 344 p. (In Russ.).
13. Virstyuk A.Yu., Mishina V.S. Application of regression analysis to assess the performance of oil wells with paraffin oil. Bulletin of Tomsk Polytechnic University. Georesources Engineering. 2020; 331(1): 117-124. (In Russ.).
14. Ivanishchev Yu.G., Davydov V.M., Sarygin A.V. Comparative analysis of the calculated parameters of the regression model depending on the sample size and the method of calculating variances. Bulletin of the Pacific State University. 2022;2(65):51-60. (In Russ.).
15. Noskov S.I. Method of resolving alternativeness in estimating parameters of regression models. Models, systems, networks in economics, technology, nature and society. 2023;4(48):154-162. (In Russ.).
16. Pardoe I. Applied Regression Modeling. John Wiley & Sons, Inc., 2021.
17. Noskov S.I. Minimization of the average and maximum relative errors of approximation of the regression model. Bulletin of Tula State University. Engineering sciences. 2023;(1): 340-343.
18. Noskov S.I. On data clustering based on the properties of linear regression parameter identification methods. Information technologies and mathematical modeling in complex systems management. 2022;4(16): 82-85. (In Russ.).
19. Industry of Russia 2010: Statistical Collection. Moscow: Rosstat, 2010:453 p. (In Russ.).
20. Industrial Production in Russia. 2016: Statistical Collection. Moscow: Rosstat, 2016: 347 p. (In Russ.).
21. Industrial production in Russia. 2019: Statistical collection. Moscow: Rosstat, 2019:286 p. (In Russ.).
22. Industrial production in Russia. 2023: Statistical collection. Moscow: Rosstat, 2023:259 p. (In Russ.).
23. Industrial production. Rosstat. (In Russ.). URL: https://rosstat.gov.ru/enterprise_industrial (accessed: 18.09.2024).

Сведения об авторах:

Носков Сергей Иванович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры информационных технологий и защиты информации; sergey.noskov.57@mail.ru

Беляев Сергей Вячеславович, магистрант кафедры информационных технологий и защиты информации; bsv2001@list.ru

Information about authors:

Sergey I. Noskov, Dr. Sci. (Eng), Prof., Prof., Department of Information Technologies and Information Security; sergey.noskov.57@mail.ru

Sergey V. Belyaev, Master's student, Department of Information Technologies and Information Security; bsv2001@list.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/ Received 22.10.2024.

Одобрена после рецензирования / Reviced 30.11.2024.

Принята в печать /Accepted for publication 14.01.2025.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 621.391



DOI: 10.21822/2073-6185-2025-52-1-113-121

Оригинальная статья/ Original article

Оценивание вероятности доставки сообщений в IoMT-системе

К.А. Польщиков, Т.Н. Махди

Белгородский государственный национальный исследовательский университет,
308015, г. Белгород, ул. Победы, 85, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является разработка модели для оценивания вероятности доставки сообщений в системе Интернета вещей медицинского назначения (IoMT-системе) и исследования зависимости этой величины от числа повторных передач, применяемых для восполнения искаженных или потерянных телеметрических данных.

Метод. Передача телеметрических сообщений осуществляется в соответствии с протоколом MQTT-SN. Доставка сообщений выполняется с использованием сервера как устройства-посредника, к которому подключаются устройства-клиенты, т.е. сенсорные устройства, передающие измеряемые данные, и беспроводные устройства медработников, принимающие эти данные. Для разработки модели доставки сообщений предложено применение аппарата вероятностных графов. Проверка адекватности модели выполнялась на основе проведения вычислительных экспериментов. **Результат.** Разработана математическая модель процесса доставки телеметрических сообщений в IoMT-системе, которая адекватно отражает зависимость вероятности доставки сообщений от характеристик беспроводных каналов, параметров передаваемых пакетов и подтверждений, а также разрешенного числа повторных передач. **Вывод.** Результаты вычислительных экспериментов, выполненных на основе применения разработанной модели, показали, что модель может быть использована для оценивания вероятности доставки сообщения в системе Интернета вещей медицинского назначения. Применение модели предоставляет возможность выбрать теоретически обоснованные значения допустимого числа повторных передач, устанавливаемого для достижения требуемых значений вероятности доставки сообщений в условиях текущего уровня интенсивности битовых ошибок в беспроводных каналах.

Ключевые слова: IoMT, протокол MQTT-SN, сенсорное устройство, вероятность доставки телеметрических сообщений, повторные передачи, BER.

Для цитирования: К.А. Польщиков, Т.Н. Махди. Оценивание вероятности доставки сообщений в IoMT-системе. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025;52(1):113-121. DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-1-113-121

Estimating the probability of messages delivery in an IoT system

K.A. Polshchikov, T.N. Mahdi

Belgorod National Research University,
85 Pobeda St., Belgorod 308015, Russia

Abstract. Objective. The aim of the study is to develop a model for estimating the probability of message delivery in a medical Internet of Things (IoMT) system and to study the dependence of this value on the number of retransmissions used to compensate for distorted or lost telemetry data. **Method.** The transmission of telemetry messages is carried out in accordance with the MQTT-SN protocol. Message delivery is performed using the server as an intermediary device to which client devices connect, i.e. sensor devices that transmit measured data, and wireless devices for healthcare workers that receive this data. To develop a message delivery model, it is proposed to use the apparatus of probabilistic graphs. The adequacy of the model was veri-

fied based on computational experiments. **Result.** A mathematical model of the process of delivering telemetry messages in an IoT system has been developed, which adequately reflects the dependence of the probability of message delivery on the characteristics of wireless channels, parameters of transmitted packets and acknowledgments, as well as the allowed number of retransmissions. **Conclusion.** The model can be used to estimate the probability of message delivery in the medical Internet of Things system. The use of the model makes it possible to select theoretically justified values of the permissible number of retransmissions, established to achieve the required values of message delivery probability under the current level of bit error rate in wireless channels.

Keywords: IoT, MQTT-SN protocol, sensor device, telemetry message delivery probability, retransmissions, BER.

For citation: K.A. Polshchikov, T.N. Mahdi. Estimating the probability of messages delivery in an IoT system. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2025; 52(1):113-121. (In Russ) DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-1-113-121

Введение. В настоящее время актуальны исследования, связанные с разработкой и совершенствованием беспроводных систем передачи данных, применение которых позволяет обеспечить информационный обмен для решения многочисленных прикладных задач. Значительное число научных публикаций посвящено развитию беспроводных самоорганизующихся (ad hoc) сетей (MANET [1–7], FANET [8–11], VANET [12–14]), а также сенсорных сетей [15–17], функционирующих в рамках систем Интернета вещей (Internet of Things, IoT) различного назначения: промышленного Интернета вещей [18, 19], «умного города» [20, 21], «точного сельского хозяйства» [22–24] и т.д.

В последние годы активно развиваются системы Интернета вещей медицинского назначения (Internet of Medical Things, IoMT). Применение IoMT-систем весьма полезно для осуществления удаленного мониторинга за пациентами, нуждающимися в постоянном наблюдении [25, 26]. С помощью таких систем медперсоналу предоставляется возможность в реальном времени отслеживать значения физиологических параметров организма, измеряемые прикрепленными к телу человека датчиками. В этой связи важное значение имеет обеспечение высокой вероятности доставки телеметрических сообщений, что позволяет медицинским работникам при необходимости своевременно оказывать помощь наблюдаемым пациентам при недопустимом ухудшении их показателей жизненно важных функций.

Постановка задачи. Многие современные IoMT-системы функционируют на основе применения протокола MQTT-SN [27]. В соответствии с этим протоколом доставка телеметрических сообщений выполняется с использованием сервера как устройства-посредника, к которому подключаются устройства-клиенты.

В качестве таких клиентов в IoMT-системе выступают, во-первых, сенсорные приемо-передающие устройства, которые осуществляют отправку на сервер телеметрических сообщений, содержащих результаты измерений, и во-вторых, беспроводные устройства медицинских работников, на которые вышеуказанные сообщения передаются из сервера. В процессе доставки из сенсорных узлов на сервер и далее из сервера на IoT-устройства медработников телеметрические сообщения могут искажаться под влиянием помех, а также чрезмерно задерживаться в канальных очередях, образующихся из-за низкой скорости передачи данных в беспроводных каналах.

Эти факторы уменьшают величину *PDEL* – вероятность доставки сообщений в IoMT-системе. В целях повышения значений *PDEL* протоколом MQTT-SN предусмотрены повторные передачи искаженных или потерянных сообщений. Важным параметром протокола является разрешенное число повторных передач. В целях оценивания величины *PDEL* и изучения влияния на ее значение числа повторных передач требуется разработать модель доставки сообщений в IoMT-системе.

Методы исследования. Разработку модели доставки сообщения в IoMT-системе предлагается осуществить на основе применения аппарата вероятностных графов [10, 15, 28]. Этот математический аппарат позволяет учесть все возможные состояния моделируемого процесса и вероятности переходов из одних состояний в другие.

Для оценивания вероятности доставки сообщения в IoMT-системе построен вероятностный граф (рис. 1).

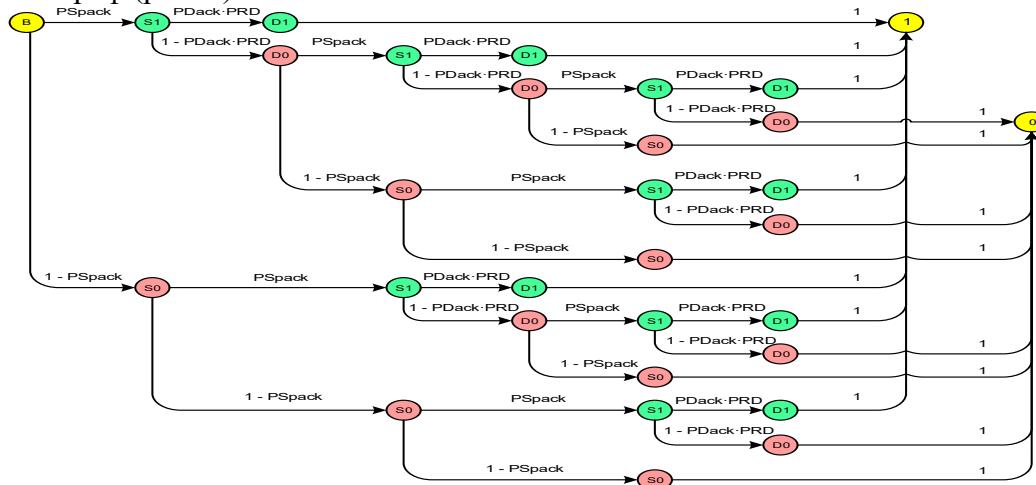


Рис. 1- Вероятностный граф, моделирующий процесс доставки сообщения из сенсорного устройства на сервер при $NDretry = 2$

Fig. 1 - Probabilistic graph modeling the process of delivering a message from a sensor device to a server when $NDretry = 2$

Начальное состояние моделируемого процесса обозначено вершиной «В». В этом состоянии установлено беспроводное подключение сенсорного устройства к серверу и начинается передача пакета PUBLISH из сенсорного устройства на сервер. С вероятностью $PSpack$ этот пакет будет корректно принят сервером, и моделируемый процесс перейдет из состояния «В» в состояние «S1». Значение вероятности корректного приема сервером пакета PUBLISH можно вычислить по формуле:

$$PSpack = 1 - (Lpack \cdot BER1), \quad (1)$$

где $Lpack$ – битовая длина пакета PUBLISH; $BER1$ – интенсивность битовых ошибок в беспроводных каналах, соединяющих сенсорное устройство с сервером.

Далее в соответствии с протоколом MQTT-SN из сервера на сенсорное устройство осуществляется передача пакета-подтверждения PUBACK. Из состояния «S1» моделируемый процесс может перейти в состояние «D1», которое обозначает корректный и своевременный прием пакета-подтверждения сенсорным устройством.

С вероятностью $PDack$ подтверждение будет корректно принято сенсорным устройством, а с вероятностью PRD подтверждающий пакет PUBACK будет принят сенсорным устройством своевременно, т.е. до момента срабатывания таймера повторной передачи, поэтому переход из состояния «S1» в состояние «D1» произойдет с вероятностью $PDack \cdot PRD$.

Значение вероятности корректного приема сенсорным устройством пакета-подтверждения PUBACK можно вычислить по формуле:

$$PDack = 1 - (Lack \cdot BER1), \quad (2)$$

где $Lack$ – битовая длина пакета-подтверждения PUBACK.

Из состояния «D1» с вероятностью, равной 1, моделируемый процесс перейдет в состояние «1», которое обозначает, что доставка сообщения из сенсорного на сервер успешна окончена.

Из состояния «S1» возможен также переход в состояние «D0», которое соответствует некорректному или несвоевременному приему пакета-подтверждения сенсорным устройством. Вероятность такого перехода равна $(1 - PDack \cdot PRD)$. Если моделируемый процесс перешёл в состояние «D0», то из сенсорного устройства на сервер осуществляется повторная передача, т.е. отправляется дубликат пакета PUBLISH.

С вероятностью $PSpack$ моделируемый процесс перейдет из состояния «D0» в состояние «S1». Возможен также переход из состояния «D0» в состояние «S0». Такой переход осуществляется, если дубликат пакета PUBLISH, отправленный из сенсорного устройства, не будет корректно принят сервером. Вероятность перехода из состояния «D0» в состояние «S0» равна $(1 - PSpack)$.

Из состояния «S0» с вероятностью $PSpack$ возможен переход в состояние «S1», а с вероятностью $(1 - PSpack)$ моделируемый процесс снова перейдет в состояние «S0». В первом случае после предыдущей неудачной попытки дубликат пакета PUBLISH всё же будет корректно принят сервером, а во втором случае повторная попытка его передать из сенсорного устройства на сервер опять окажется неудачной.

Если из сенсорного устройства разрешенное число попыток повторно передать на сервер пакет PUBLISH будет исчерпано, и моделируемый процесс при этом будет находиться в состоянии «D0» или «S0», то возможен переход с вероятностью, равной 1, только в состояние «0», которое обозначает, что доставить сообщение из сенсорного устройства на сервер так и не удалось.

Вероятность доставки сообщения из сенсорного устройства на сервер при $NDretry = 2$ соответствует вероятности перехода из состояния «B» в состояние «1».

Значение этой вероятности можно оценить с помощью выражения:

$$\begin{aligned} PDEL1 &= PSpack \cdot PDack \cdot PRD + \\ &+ PSpack \cdot (1 - PDack \cdot PRD) \cdot PSpack \cdot PDack \cdot PRD + \\ &+ PSpack \cdot (1 - PDack \cdot PRD) \cdot PSpack \cdot (1 - PDack \cdot PRD) \cdot PSpack \cdot PDack \cdot PRD + \\ &+ PSpack \cdot (1 - PDack \cdot PRD) \cdot (1 - PSpack) \cdot PSpack \cdot PDack \cdot PRD + \\ &+ (1 - PSpack) \cdot PSpack \cdot PDack \cdot PRD + \\ &+ (1 - PSpack) \cdot PSpack \cdot (1 - PDack \cdot PRD) \cdot PSpack \cdot PDack \cdot PRD + \\ &+ (1 - PSpack) \cdot (1 - PSpack) \cdot PSpack \cdot PDack \cdot PRD = \\ &= PSpack \cdot PDack \cdot PRD \cdot \left(1 + \sum_{k=1}^2 (1 - PSpack \cdot PDack \cdot PRD)^k \right). \end{aligned} \quad (3)$$

Было проведено также моделирование процесса доставки сообщения из сенсорного устройства на сервер при $NDretry = 1, 3$ и 4 . Результаты моделирования позволили вывести обобщенную формулу для оценивания вероятности доставки сообщения из сенсорного устройства на сервер при любом натуральном числе $NDretry$:

$$PDEL1 = PSpack \cdot PDack \cdot PRD \cdot \left(1 + \sum_{k=1}^{NDretry} (1 - PSpack \cdot PDack \cdot PRD)^k \right). \quad (4)$$

Аналогичным образом проведено моделирование процесса доставки сообщения из сервера на IoT-устройство медработника. В результате удалось получить выражение для оценивания вероятности доставки сообщения из сервера на IoT-устройство медработника:

$$PDEL2 = PDpack \cdot PSack \cdot PRS \cdot \left(1 + \sum_{k=1}^{NSretry} (1 - PDpack \cdot PSack \cdot PRS)^k \right), \quad (5)$$

где $PDpack$ – вероятность корректного приема пакета PUBLISH IoT-устройством медработника; $PSack$ – вероятность корректного приема сервером пакета-подтверждения PUBACK; PRS – вероятность приема сервером пакета-подтверждения

PUBACK до момента срабатывания таймера повторной передачи; $NSretry$ – разрешенное число повторных передач из сервера.

Значение вероятности корректного приема пакета PUBLISH IoT-устройством медработника можно вычислить по формуле:

$$PD_{pack} = 1 - (L_{pack} \cdot BER2), \quad (6)$$

где $BER2$ – интенсивность битовых ошибок в беспроводных каналах, соединяющих сервер с IoT-устройством медработника.

Значение вероятности корректного приема сервером пакета-подтверждения PUBACK можно вычислить по формуле:

$$PS_{ack} = 1 - (L_{ack} \cdot BER2). \quad (7)$$

Наконец, результирующую вероятность доставки сообщения в IoMT-системе можно оценить с помощью выражения:

$$PDEL = PDEL1 + PDEL2. \quad (8)$$

С использованием выражений (1) – (8) были проведены вычислительные эксперименты для исследования зависимости вероятности доставки сообщения в IoMT-системе от различных параметров. Результаты вычислительных экспериментов представлены ниже.

Обсуждение результатов. С применением разработанной модели процесса доставки сообщения в IoMT-системе и исходных данных, представленных в табл. 1, были проведены вычислительные эксперименты.

Таблица 1. Исходные данные

Table 1. Initial data

№ п/п	Величины Quantities	Значения Values	Единицы измерения Units of measurement
1	PRD	1	-
2	PRS	1	-
3	L_{pack}	256	бит
4	L_{ack}	256	бит

Полученные результаты показаны на рис. 2 – 4. На рис. 2 изображена диаграмма зависимости величины $PDEL$ от значений $BER1$ при фиксированных значениях $BER2 = 7 \times 10^{-4}$, $NDretry = 2$ и $NSretry = 2$.

Анализ диаграммы показывает, что вероятность доставки сообщений в IoMT-системе уменьшается с ростом интенсивности битовых ошибок в беспроводных каналах.

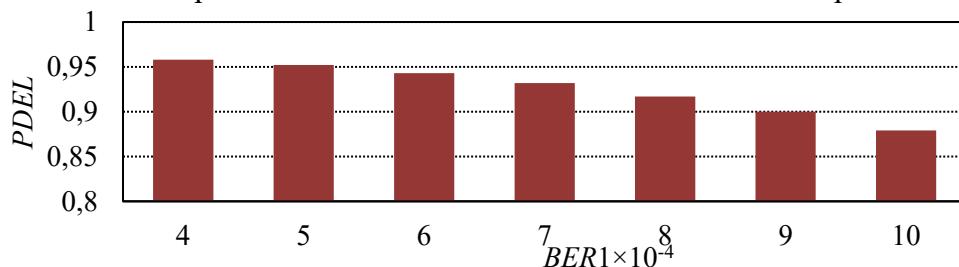


Рис. 2 - Диаграмма зависимости величины $PDEL$ от значений $BER1$
 при $BER2 = 7 \times 10^{-4}$, $NDretry = 2$, $NSretry = 2$

Fig. 2- Diagram of the dependence of the value of $PDEL$ on the value of $BER1$
 at $BER2 = 7 \times 10^{-4}$, $NDretry = 2$, $NSretry = 2$

На рис. 3 показана диаграмма зависимости величины $PDEL$ от значений $NDretry$ при фиксированных значениях $BER1 = 8 \times 10^{-4}$, $BER2 = 7 \times 10^{-4}$ и $NSretry = 2$.

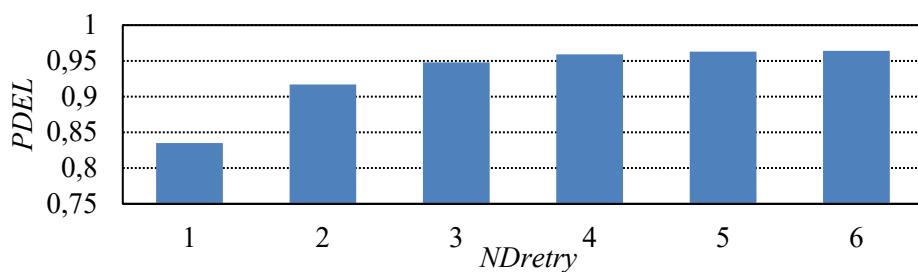


Рис. 3- Диаграмма зависимости величины **PDEL** от значений **NDretry**

при $BER1 = 8 \times 10^{-4}$, $BER2 = 7 \times 10^{-4}$, $NSretry = 2$

Fig. 3 - Diagram of the dependence of the value of **PDEL** on the value of **NDretry**

at $BER1 = 8 \times 10^{-4}$, $BER2 = 7 \times 10^{-4}$, $NSretry = 2$

Диаграмма зависимости величины **PDEL** от значений **NSretry** при фиксированных значениях $BER1 = 8 \times 10^{-4}$, $BER2 = 7 \times 10^{-4}$ и $NDretry = 2$ представлена на рис. 4. Из указанных диаграмм видно, что с увеличением числа повторных передач вероятность доставки сообщений в IoMT-системе повышается.

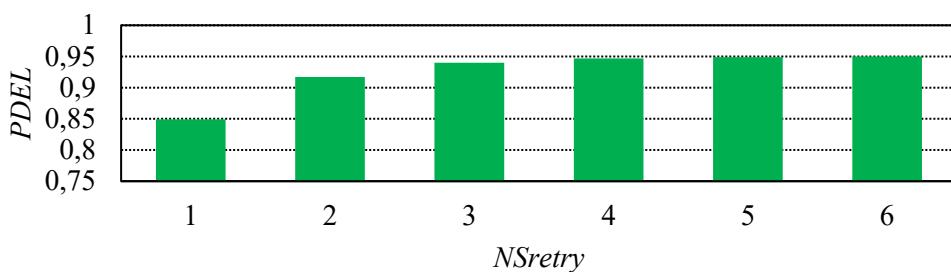


Рис. 4- Диаграмма зависимости величины **PDEL** от значений **NSretry**

при $BER1 = 8 \times 10^{-4}$, $BER2 = 7 \times 10^{-4}$, $NDretry = 2$

Fig. 4- Diagram of the dependence of the value of **PDEL** on the value of **NSretry**

at $BER1 = 8 \times 10^{-4}$, $BER2 = 7 \times 10^{-4}$, $NDretry = 2$

Вывод. Таким образом, можно сделать вывод о том, что результаты вычислительных экспериментов, выполненных на основе применения разработанной модели доставки сообщения в IoMT-системе, соответствуют логике процессов в области теории и практики передачи информации.

Представленная в статье модель может быть использована для оценивания вероятности доставки сообщения в системе Интернета вещей медицинского назначения.

Применение модели предоставляет возможность выбрать теоретически обоснованные значения допустимого числа повторных передач, устанавливаемого для достижения требуемых значений вероятности доставки сообщений в условиях текущего уровня интенсивности битовых ошибок в беспроводных каналах.

Библиографический список:

1. Wang N., He J., Xiang S., Yang J. Transmission reliability evaluation of the wireless mobile ad hoc network considering the routing protocol and randomness of channel capacity. *Quality and Reliability Engineering International*. 2024; 40: 664-680. DOI: 10.1002/qre.3432.
2. Константинов И.С., Польщиков К.А., Лазарев С.А. Имитационная модель передачи информационных потоков в мобильной радиосети специального назначения. *Научные ведомости Белгородского*

- государственного университета. Серия: Экономика. Информатика. 2015; 13(210): 156-163. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24313935>.
- 3. Elias E.M., Baharuddin M.N., Zaki M., Nur A., Roshartini O., Santoso B. Analyzing Data Transmission Reliability in Mobile Ad-Hoc Networks under Dynamic Scenarios. International Journal of Interactive Mobile Technologies. 2024; 18(11): 41. DOI: 10.3991/ijim.v18i11.49061.
 - 4. Konstantinov I., Polshchykov K., Lazarev S., Polshchykova O. Model of Neuro-Fuzzy Prediction of Confirmation Timeout in a Mobile Ad Hoc Network. CEUR Workshop Proceedings. Mathematical and Information Technologies. 2017; 1839: 174-186. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=31032898>.
 - 5. Polshchykov K.O., Lazarev S.A., Zdorovtsov A.D. Neuro-Fuzzy Control of Data Sending in a Mobile Ad Hoc Network. Journal of Fundamental and Applied Sciences. 2017; 9(2S): 1494-1501. DOI: 10.4314/jfas.v9i2s.856.
 - 6. Bhatti D.S., Saleem S., Imran A. et al. Detection and isolation of wormhole nodes in wireless ad hoc networks based on post-wormhole actions. Scientific Reports. 2024; 14. DOI: 10.1038/s41598-024-53938-9.
 - 7. Polshchykov K.O., Lazarev S.A., Kiseleva E.D. Mathematical Model of Multimedia Information Exchange in Real Time Within a Mobile Ad Hoc Network. International Journal of Computer Science and Network Security. 2018; 18(6): 20-24. URL: http://paper.ijcsns.org/07_book/201806/20180603.pdf.
 - 8. Soran A.H., Marwan A.M., Sazan K.S. Flying Ad-Hoc Networks (FANETs): Review of Communications, Challenges, Applications, Future direction and Open Research Topics. ITM Web Conferences. 2024; 64: 01002. DOI: 10.1051/itmconf/20246401002.
 - 9. Kundu J., Alam S., Das J. C., Dey A., De D. Trust based Flying ad-hoc Network: A Survey. IEEE Access. 2024. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3419904.
 - 10. Джамил К.Дж.К., Лихошерстов Р.В., Польщиков К.А. Модель передачи видеопотоков в летающей беспроводной самоорганизующейся сети. Экономика. Информатика. 2022; 49(2): 403-415. DOI: 10.52575/2687-0932-2022-49-2-403-415.
 - 11. Bhatia T.K., Gilhotra S., Bhandari S.S., Suden R. Flying Ad-Hoc Networks (FANETs): A Review. EAI Endorsed Transactions on Energy Web. 2024; 11. URL: <https://publications.eai.eu/index.php/ew/article/view/5489>.
 - 12. Hemmati A., Zarei M., Rahmani A.M. A systematic review of congestion control in internet of vehicles and vehicular ad hoc networks: Techniques, challenges, and open issues. International Journal of Communication Systems. 2024; 37(1): e5625. DOI: 10.1002/dac.5625.
 - 13. Wu C.-M., Tsai C.-T., Hou C.-C., Yang J.-J., Lin G.-D., Kuang M.-Y. Emergency Message Broadcast Mechanism in Vehicular Ad-Hoc Networks Based on Reinforcement Learning With Contention Estimation. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles. 2024. DOI: 10.1109/TIV.2024.3418778.
 - 14. Alaya B., Sellami L., Lorenz P. An ontological approach to the detection of anomalies in vehicular ad hoc networks. Ad Hoc Networks. 2024; 156: 103417. DOI: 10.1016/j.adhoc.2024.103417.
 - 15. Ясир М.Д.Я., Польщиков К.А., Федоров В.И. Модель доставки сообщения в сенсорной сети с низким энергопотреблением. Экономика. Информатика. 2023; 50(2): 439-447. DOI: 10.52575/2687-0932-2023-50-2-439-447
 - 16. Gulati K., Boddu R.S.K., Kapila D., Bangare S.L., Chandnani N., Saravanan G. A review paper on wireless sensor network techniques in Internet of Things (IoT). Materials Today: Proceedings. 2022; 51(1): 161-165. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.05.067.
 - 17. Yaser M.J., Polshchykov K.A., Polshchikov I.K. Algorithm for ensuring the minimum power consumption of the end node in the LoRaWAN network. Periodicals of Engineering and Natural Sciences. 2023; 11(4): 168-174. URL: <http://dx.doi.org/10.21533/pen.v11i4.3779>.
 - 18. Munirathinam S. Industry 4.0: Industrial Internet of Things (IIOT). Advances in Computers. 2020; 117(1): 129-164. DOI: 10.1016/bs.adcom.2019.10.01.
 - 19. Tabaa M., Monteiro F., Bensag H., Dandache A. Green Industrial Internet of Things from a smart industry perspectives. Energy Reports. 2020; 6(6): 430-446. DOI: 10.1016/j.egyr.2020.09.022.
 - 20. Jiang D. The construction of smart city information system based on the Internet of Things and cloud computing. Computer Communications. 2020; 150: 158-166. DOI: 10.1016/j.comcom.2019.10.035.
 - 21. Ghazal T.M., Hasan M.K., Alzoubi H.M., Alshurideh M., Ahmad M., Akbar S.S. Internet of Things Connected Wireless Sensor Networks for Smart Cities. Studies in Computational Intelligence. 2023; 1056. DOI: 10.1007/978-3-031-12382-5_107.
 - 22. Sanjeevi P., Prasanna S., Siva Kumar B., Gunasekaran G., Alagiri I., Vijay Anand R. Precision agriculture and farming using Internet of Things based on wireless sensor network. Transactions on Emerging Telecommunications Technologies. 2020; 31:e3978. DOI: 10.1002/ett.3978.
 - 23. Polshchykov K., Shabeeb A. H. T., Lazarev S., Kiselev V. Justification for the decision on loading channels of the network of geoecological monitoring of resources of the agroindustrial complex. Periodicals of Engineering and Natural Sciences. 2021; 9(3): 781-787. URL: <http://dx.doi.org/10.21533/pen.v9i3.2281>.

24. Abu N. S., Bukhari W. M., Ong C. H., Kassim A. M., Izzuddin T. A., Sukhaimie M.N., Norasikin M.A., Rasid A.F.A. Internet of Things Applications in Precision Agriculture: A Review. *Journal of Robotics and Control*. 2022; 3(3). URL: <https://journal.umy.ac.id/index.php/jrc/article/view/14159>.
25. Razdan S., Sharma S. Internet of Medical Things (IoMT): Overview, Emerging Technologies, and Case Studies. *IETE Technical Review*. 2021; 39(4): 775-788. DOI: 10.1080/02564602.2021.1927863.
26. Arora S. IoMT (Internet of Medical Things): Reducing Cost While Improving Patient Care. *IEEE Pulse*, 2020; 11(5): 24-27. DOI: 10.1109/MPULS.2020.3022143.
27. Shanmugapriya D., Patel A., Srivastava G., Lin J.C.W. MQTT Protocol Use Cases in the Internet of Things. *Lecture Notes in Computer Science*. 2021; 13147. DOI: 10.1007/978-3-030-93620-4_12.
28. Jameel J.Q., Mahdi T.N., Polshchikov K.A., Lazarev S.A., Likhosherstov R.V., Kiselev V.E. Development of a mathematical model of video monitoring based on a self-organizing network of unmanned aerial vehicles. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*. 2022; 10(6): 84-95. URL: <http://dx.doi.org/10.21533/pen.v10i6.3381>.

References:

1. Wang N., He J., Xiang S., Yang J. Transmission reliability evaluation of the wireless mobile ad hoc network considering the routing protocol and randomness of channel capacity. *Quality and Reliability Engineering International*. 2024; 40: 664-680. DOI: 10.1002/qre.3432.
2. Konstantinov I.S., Polshchikov K.A., Lazarev S.A. Simulation model for transmitting information flows in a special-purpose mobile radio network. *Scientific bulletins of Belgorod State University. Series: Economics. Computer science*. 2015; 13(210): 156-163. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24313935>. (In Russ).
3. Elias E.M., Baharuddin M.N., Zaki M., Nur A., Roshartini O., Santoso B. Analyzing Data Transmission Reliability in Mobile Ad-Hoc Networks under Dynamic Scenarios. *International Journal of Interactive Mobile Technologies*. 2024; 18(11): 41. DOI: 10.3991/ijim.v18i11.49061.
4. Konstantinov I., Polshchikov K., Lazarev S., Polshchikova O. Model of Neuro-Fuzzy Prediction of Confirmation Timeout in a Mobile Ad Hoc Network. *CEUR Workshop Proceedings. Mathematical and Information Technologies*. 2017; 1839: 174-186. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=31032898>.
5. Polshchikov K.O., Lazarev S.A., Zdrovtsov A.D. Neuro-Fuzzy Control of Data Sending in a Mobile Ad Hoc Network. *Journal of Fundamental and Applied Sciences*. 2017; 9(2S): 1494-1501. DOI: 10.4314/jfas.v9i2s.856.
6. Bhatti D.S., Saleem S., Imran A. et al. Detection and isolation of wormhole nodes in wireless ad hoc networks based on post-wormhole actions. *Scientific Reports*. 2024; 14. DOI: 10.1038/s41598-024-53938-9.
7. Polshchikov K.O., Lazarev S.A., Kiseleva E.D. Mathematical Model of Multimedia Information Exchange in Real Time Within a Mobile Ad Hoc Network. *International Journal of Computer Science and Network Security*. 2018; 18(6): 20-24. URL: http://paper.ijcsns.org/07_book/201806/20180603.pdf.
8. Soran A.H., Marwan A.M., Sazan K.S. Flying Ad-Hoc Networks (FANETs): Review of Communications, Challenges, Applications, Future direction and Open Research Topics. *ITM Web Conferences*. 2024; 64: 01002. DOI: 10.1051/itmconf/20246401002.
9. Kundu J., Alam S., Das J. C., Dey A., De D. Trust based Flying ad-hoc Network: A Survey. *IEEE Access*. 2024. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3419904.
10. Jameel K.J.Q., Likhosherstov R.V., Polshchikov K.A. Model of Video Streams Transmission in a Flying Ad Hoc Network. *Economics. Information technologies*. 2022; 49(2): 403-415 DOI: 10.52575/2687-0932-2022-49-2-403-415. (In Russ).
11. Bhatia T.K., Gilhotra S., Bhandari S.S., Suden R. Flying Ad-Hoc Networks (FANETs): A Review. *EAI Endorsed Transactions on Energy Web*. 2024; 11. URL: <https://publications.eai.eu/index.php/ew/article/view/5489>.
12. Hemmati A., Zarei M., Rahmani A.M. A systematic review of congestion control in internet of vehicles and vehicular ad hoc networks: Techniques, challenges, and open issues. *International Journal of Communication Systems*. 2024; 37(1): e5625. DOI: 10.1002/dac.5625.
13. Wu C.-M., Tsai C.-T., Hou C.-C., Yang J.-J., Lin G.-D., Kuang M.-Y. Emergency Message Broadcast Mechanism in Vehicular Ad-Hoc Networks Based on Reinforcement Learning With Contention Estimation. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*. 2024. DOI: 10.1109/TIV.2024.3418778.
14. Alaya B., Sellami L., Lorenz P. An ontological approach to the detection of anomalies in vehicular ad hoc networks. *Ad Hoc Networks*. 2024; 156: 103417. DOI: 10.1016/j.adhoc.2024.103417.
15. Yaser M.J.Y., Polshchikov K.A., Fedorov V.I. Message Delivery Model in a LowPower Sensor Network. *Economics. Information technologies*. 2023; 50(2): 439-447 DOI: 10.52575/2687-0932-2023-50-2-439-447. (In Russ).
16. Gulati K., Boddu R.S.K., Kapila D., Bangare S.L., Chandnani N., Saravanan G. A review paper on wireless sensor network techniques in Internet of Things (IoT). *Materials Today: Proceedings*. 2022; 51(1): 161-165. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.05.067.

17. Yaser M.J., Polshchikov K.A., Polshchikov I.K. Algorithm for ensuring the minimum power consumption of the end node in the LoRaWAN network. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*. 2023; 11(4): 168-174. URL: <http://dx.doi.org/10.21533/pen.v11i4.3779>.
18. Munirathinam S. Industry 4.0: Industrial Internet of Things (IIOT). *Advances in Computers*. 2020; 117(1): 129-164. DOI: 10.1016/bs.adcom.2019.10.01.
19. Tabaa M., Monteiro F., Bensag H., Dandache A. Green Industrial Internet of Things from a smart industry perspectives. *Energy Reports*. 2020; 6(6): 430-446. DOI: 10.1016/j.egyr.2020.09.022.
20. Jiang D. The construction of smart city information system based on the Internet of Things and cloud computing. *Computer Communications*, 2020; 150: 158-166. DOI: 10.1016/j.comcom.2019.10.035.
21. Ghazal T.M., Hasan M.K., Alzoubi H.M., Alshurideh M., Ahmad M., Akbar S.S. Internet of Things Connected Wireless Sensor Networks for Smart Cities. *Studies in Computational Intelligence*. 2023; 1056. DOI: 10.1007/978-3-031-12382-5_107.
22. Sanjeevi P., Prasanna S., Siva Kumar B., Gunasekaran G., Alagiri I., Vijay Anand R. Precision agriculture and farming using Internet of Things based on wireless sensor network. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*. 2020; 31:e3978. DOI: 10.1002/ett.3978.
23. Polshchikov K., Shabeef A. H. T., Lazarev S., Kiselev V. Justification for the decision on loading channels of the network of geoecological monitoring of resources of the agroindustrial complex. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*. 2021; 9(3): 781-787. URL: <http://dx.doi.org/10.21533/pen.v9i3.2281>.
24. Abu N. S., Bukhari W. M., Ong C. H., Kassim A. M., Izzuddin T. A., Sukhaimie M.N., Norasikin M.A., Rasid A.F.A. Internet of Things Applications in Precision Agriculture: A Review. *Journal of Robotics and Control*. 2022; 3(3). URL: <https://journal.umy.ac.id/index.php/jrc/article/view/14159>.
25. Razdan S., Sharma S. Internet of Medical Things (IoMT): Overview, Emerging Technologies, and Case Studies. *IETE Technical Review*. 2021; 39(4): 775-788. DOI: 10.1080/02564602.2021.1927863.
26. Arora S. IoMT (Internet of Medical Things): Reducing Cost While Improving Patient Care. *IEEE Pulse*, 2020; 11(5): 24-27. DOI: 10.1109/MPULS2020.3022143.
27. Shanmugapriya D., Patel A., Srivastava G., Lin J.C.W. MQTT Protocol Use Cases in the Internet of Things. *Lecture Notes in Computer Science*. 2021; 13147. DOI: 10.1007/978-3-030-93620-4_12.
28. Jameel J.Q., Mahdi T.N., Polshchikov K.A., Lazarev S.A., Likhoshsterstov R.V., Kiselev V.E. Development of a mathematical model of video monitoring based on a self-organizing network of unmanned aerial vehicles. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*. 2022; 10(6): 84-95. URL: <http://dx.doi.org/10.21533/pen.v10i6.3381>.

Сведения об авторах:

Польщиков Константин Александрович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры информационных и робототехнических систем; polshchikov@mail.ru.

Махди Тарек Нассер, аспирант кафедры прикладной информатики и информационных технологий; tareq.nasser.m@gmail.com.

Information about authors:

Konstantin A. Polshchikov, Dr. Sci. (Eng), Prof., Assoc. Prof., Prof., Department of Information and Robotic Systems; polshchikov@mail.ru.

Mahdi Tarek Nasser, Graduate student, Department of Applied Informatics and Information Technologies; tareq.nasser.m@gmail.com.

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/ Received 16.09.2024.

Одобрена после рецензирования / Revised 26.10.2024.

Принята в печать /Accepted for publication 17.01.2025.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 004+45

DOI: 10.21822/2073-6185-2025-52-1-122-133



Обзорная статья/ Review article

Сравнительный анализ фреймворков для разработки мобильных приложений: нативные, гибридные или кроссплатформенные решения

А.Б. Темирова

Грозненский государственный нефтяной технический университет
имени акад. М.Д.Миллионщикова,
364051, г. Грозный, пр. Исаева,100, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является проведение сравнительного анализа различных фреймворков для разработки мобильных приложений: нативных, гибридных и кроссплатформенных решений. **Метод.** Для достижения цели использовались методы анализа, синтеза и сравнения. Проанализированы характеристики различных фреймворков для разработки мобильных приложений, включая их производительность, стоимость и доступ к возможностям устройств. **Результат.** Выявлено, что нативные фреймворки отличаются наивысшей производительностью и способностью обеспечить максимально нативный вид и функциональность приложения. Однако такой подход имеет ограничения, поскольку требует отдельной разработки для каждой платформы, что приводит к увеличению временных и ресурсных затрат. Гибридные решения оказались экономически эффективными, позволяя использовать единую кодовую базу для создания приложений для разных платформ, что упрощает процесс разработки и сопровождения. Гибридные приложения могут иметь ограниченную производительность из-за использования WebView для отображения интерфейса и ограниченного доступа к возможностям устройств. Кроссплатформенные фреймворки обеспечивают баланс между производительностью и эффективностью использования ресурсов. Они позволяют использовать единую кодовую базу для создания приложений для нескольких платформ и могут достигать удовлетворительной производительности. Однако они могут иметь ограниченный доступ к определенным возможностям устройств и внешнему виду приложений. **Вывод.** Результаты исследования вносят новый вклад в науку, предоставляя подробный сравнительный анализ различных подходов к разработке мобильных приложений и фреймворков, используемых для их создания. Полученные результаты могут быть использованы для принятия обоснованных решений относительно выбора фреймворка для разработки мобильных приложений.

Ключевые слова: Java; разработка ПО; производительность; собственный вид; кодовая база

Для цитирования: А.Б. Темирова. Сравнительный анализ фреймворков для разработки мобильных приложений: нативные, гибридные или кроссплатформенные решения. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025; 52(1):122-133. DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-1-122-133

Comparative analysis of frameworks for mobile application development: native, hybrid or cross-platform solutions

A.B. Temirova

M.D. Millionshchikov Grozny State Oil Technical University,
100 Isaev Ave., Grozny 364051, Russia

Abstract. Objective. The purpose of this study is to conduct a comparative analysis of various frameworks for the development of mobile applications: native, hybrid and cross-platform solutions. **Method.** To achieve this goal, methods of analysis, synthesis and comparison

were used. The characteristics of various mobile application development frameworks were analyzed, including their performance, cost, and access to device capabilities. **Result.** Native frameworks have been found to have the highest performance and the ability to provide the most native look and functionality for an application. This approach has limitations as it requires separate development for each platform, which leads to increased time and resource costs. Hybrid solutions have proven to be cost-effective, allowing you to use a single code base to create applications for different platforms. This simplifies the development and maintenance process. Hybrid apps may have limited performance due to the use of WebView to display the interface and limited access to device capabilities. Cross-platform frameworks, on the other hand, provide a balance between performance and resource efficiency. They allow you to use a single code base to create applications for multiple platforms and can achieve satisfactory performance. However, they may have limited access to certain device capabilities and the appearance of applications. **Conclusion.** The results make a new contribution to the field by providing a detailed analysis of mobile app development approaches and frameworks used to build them. The results can be used to make informed decisions regarding the choice of framework for mobile app development.

Keywords: Java; software development; performance; native view; code base

For citation: A.B. Temirova. Comparative analysis of frameworks for mobile application development: native, hybrid or cross-platform solutions. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2025; 52(1):122-133. (In Russ) DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-1-122-133

Введение. В современном информационном обществе разработка мобильных приложений стала одной из самых важных и актуальных областей разработки программного обеспечения. С каждым годом количество мобильных устройств растет, а вместе с ними и спрос на высококачественные и эффективные приложения. Выбор правильного подхода к разработке мобильных приложений является критически важной задачей для разработчиков и бизнеса. Исследуемый вопрос заключается в определении того, какой тип фреймворка для разработки мобильных приложений является наиболее эффективным и отвечает потребностям современного рынка программного обеспечения. Вопрос становится все более актуальным в связи с ростом числа доступных разработчикам фреймворков и подходов, расширяющих спектр возможностей мобильных приложений. В нескольких исследованиях были проанализированы и сравнены различные аспекты разработки мобильных приложений, включая выбор между нативным и гибридным подходами, определение лучших практик кроссплатформенной разработки и изучение методов выбора оптимальной платформы для кроссплатформенной разработки [1-7].

В работе Х.О. Козуб и Ю.Х. Козуб (Kozub, H. & Kozub, Yu. 2022) [8] исследовали разработку кроссплатформенных мобильных приложений с использованием Kotlin Multiplatform и Jetpack Compose для различных операционных систем, включая Android, Windows, Linux и macOS. Они демонстрируют важность этих инструментов и потенциал сокращения времени разработки и предотвращения ошибок благодаря их использованию. Кроме того, авторы подчеркивают необходимость использования декларативного подхода при создании пользовательских интерфейсов.

О. Карапанов и соавторы (Karatanov, O., Yena, M., Bova, Y., & Ustymenko, O., 2021) провели сравнительный анализ двух важных фреймворков для модульного тестирования на языке программирования Java – JUnit и TestNG [7]. Они определили основные функции и преимущества обоих фреймворков, отметив, что Test- NG обладает более широкими функциональными возможностями, что делает его более гибким для сложных проектов.

В исследовании М. Сингха и Г. Шобхи (Singh, M., & Shobha, G., 2021) [13] подчеркивалась актуальность разработки кроссплатформенных мобильных приложений. Были изучены различные фреймворки для этой цели и проведен сравнительный анализ их функциональности. Основные выводы исследования подчеркивают необходимость обос-

нованного выбора структуры, основанной на конкретных требованиях проекта, не существует универсальной структуры для всех ситуаций. В статье Т. Зохуда и С. Зейна (Zohud, T., & Zein, S., 2021) [20] авторы исследуют подходы команд разработчиков к разработке кроссплатформенных мобильных приложений. Они используют качественные исследования, включая метод тематических исследований, интервью и групповые дискуссии, для сбора информации от четырех компаний-разработчиков программного обеспечения в Палестине. Результаты исследования показывают, что опыт разработчиков является ключевым фактором в процессе разработки. Фреймворк React Native признан перспективным и доминирующим.

А. Качмарчик и др. (Kaczmarczyk, A., Zajac, P., & Zabierowski, W., 2022) [6] выполнили сравнение между нативными и гибридными мобильными приложениями для операционной системы Android, с акцентом на использование BLE (Bluetooth с низким энергопотреблением) и Wi-Fi (точность беспроводной связи). Было отмечено, что мобильные приложения становятся все более популярными в эпоху смартфонов и планшетов. Авторы провели сравнительный анализ, направленный на определение эффективности обработки данных в обеих технологиях.

Исследование Р. Lachgar и соавторов (Lachgar, M., Hanine, M., Benouda, H., & Ommane, Y., 2022) [9] решает проблему разработки кроссплатформенных мобильных приложений в связи с растущей популярностью мобильных устройств. Авторы предлагают новую структуру для выбора оптимальной платформы для кроссплатформенной разработки, используя многокритериальные методы принятия решений, такие как аналитический иерархический процесс (AHP) и метод упорядочения предпочтений по сходству с идеальным решением (TOPSIS).

Постановка задачи. Целью исследования является проведение сравнительного анализа различных фреймворков для разработки мобильных приложений, а также сравнить их, учитывая ограничения и преимущества. Также были рассмотрены наиболее популярные фреймворки и инструменты для каждого подхода, чтобы предоставить объективную информацию, которая помогла бы разработчикам и организациям сделать осознанный выбор в области разработки мобильных приложений.

Методы исследования. В данном исследовании проводился сравнительный анализ фреймворков для разработки мобильных приложений с использованием нативных, гибридных и кроссплатформенных решений. Для достижения поставленной цели были использованы следующие методы: анализ, синтез и сравнение. Использование этих методов способствовало выяснению преимуществ и ограничений каждого из рассмотренных подходов в разработке мобильных приложений.

В рамках исследования для анализа были определены две основные мобильные платформы: Android и iOS, которые являются лидерами на современном рынке мобильных устройств. В ходе анализа было рассмотрено три основных подхода к разработке мобильных приложений: нативный, гибридный и кроссплатформенный. Для исследования нативных приложений использовались специализированные интегрированные среды разработки (IDE), такие как Android Studio для Android и Xcode для iOS.

Для изучения гибридных приложений использовались фреймворки, основанные на веб-технологиях, включая Apache Cordova, Ionic и React Native. Были рассмотрены кроссплатформенные фреймворки приложений, такие как Flutter, Xamarin и Appcelerator Titanium. Одним из основных критериев отбора фреймворков было их популярность и актуальность на рынке разработки мобильных приложений.

Исследование основано на анализе открытой научной литературы, которая была доступна в Интернете. Были использованы различные работы, исследования и публикации, в которых подробно описывались различные подходы и фреймворки для разработки мобильных приложений (Biørn-Hansen et al., 2020; Zohud & Zein, 2021; Lachgar et al., 2022) [2]. Анализ был сосредоточен на нескольких ключевых аспектах, включая производитель-

ность разработки, качество и быстродействие создаваемых приложений, стоимость разработки, поддержку различных мобильных платформ, расширяемость и другие важные факторы. Для каждого из рассмотренных подходов (нативных, гибридных и кроссплатформенных решений) были определены и проанализированы их преимущества и ограничения, что позволило провести объективный сравнительный анализ. Метод обобщения включал сбор информации о каждом из рассмотренных фреймворков, включая используемые языки программирования, доступность средств разработки, поддержку платформы, качество приложений, расширяемость и другие характеристики. Этот метод позволил получить полное представление о каждом подходе. Сравнение проводилось путем сопоставления полученных результатов для определения преимуществ и недостатков каждого подхода. При сравнительном анализе учитывались такие факторы, как производительность разработки, стоимость разработки, качество и производительность приложений, поддержка различных мобильных платформ, потребление памяти, расширяемость и другие параметры. На основе этого сравнительного анализа были выявлены сильные и слабые стороны каждого из рассмотренных подходов к разработке мобильных приложений. Выбор методов анализа, синтеза и сравнения для этого исследования оправданы тем, что они позволяют провести всесторонний и объективный анализ различных подходов к разработке мобильных приложений.

Метод анализа позволил глубже изучить каждый подход, выявив его особенности, технические параметры и другие характеристики. Обобщение собранной информации позволило получить полное представление о каждом подходе, что было полезно для дальнейшего сравнения. Сравнение выявило преимущества и недостатки различных подходов с учетом различных аспектов, такие, как производительность, стоимость разработки, приложение качество и производительность, поддержка различных мобильных платформ и другие факторы.

Обсуждение результатов. Нативные фреймворки для мобильных платформ – это специально разработанные инструменты, которые позволяют разработчикам создавать приложения, оптимизированные для конкретной платформы или операционной системы. Эти платформы предоставляют доступ к собственным возможностям и функциональным возможностям платформы, что приводит к разработке высокопроизводительных и эффективных программных продуктов. Ключевой особенностью этих платформ является их ориентация на разработку для конкретной платформы, такой как iOS или Android. Это означает, что разработчики имеют возможность в полной мере использовать все возможности платформы для создания приложений, которые работают оптимально и надежно. Как правило, для iOS используется язык программирования Swift и инструмент разработки Xcode, в то время как для Android это язык программирования Kotlin или Java и инструмент разработки Android Studio.

Xcode – это интегрированная среда разработки (IDE) предназначен для создания программного обеспечения для платформ iOS и macOS. Он специально разработан для языков программирования, рекомендованных Apple, включая C, C++, Objective-C, Swift, Java, AppleScript, Python и Ruby. Xcode предлагает расширенные возможности и инструменты, облегчающие процесс разработки, включая функции рефакторинга кода (Tkachuk & Bulakh, 2022) [16].

Современный Язык программирования Swift был разработан Apple для платформ iOS, macOS, watchOS и tvOS. Он призван обеспечить безопасность, производительность и выразительность кода, предлагая более удобную и эффективную альтернативу языку Objective-C (Fojtik, R., 2019) [4]. Swift интегрирован со средой разработки Xcode в операционной системе macOS. Такая интеграция позволяет разработчикам разрабатывать, тестировать и отлаживать свои программы Swift в единой среде. Xcode предоставляет ряд инструментов и функций, упрощающих процесс разработки, таких как конструктор визуального интерфейса, отладчик и симулятор для тестирования приложений

на различных устройствах (Ziyodullayevich, A.Q., Babakulovich, Z.R., Bakhodirovna, M.Z., Bekmurodovich, S.A., & Akif-ogli, M.R., 2019) [19]. Преимущество использования Xcode и Swift для разработки приложений для iOS заключается в возможности использования встроенных функций устройств Apple. Встроенная разработка позволяет создавать приложения, оптимизированные для конкретного аппаратного и программного обеспечения iOS, что приводит к повышению производительности и удобства использования. Однако это требует от разработчиков знания различных языков программирования и сред разработки (Biørn-Hansen, A., Rieger, C., Grønli, T.M., Majchrzak, T.A., & Ghinea, G., 2020) [2].

Основными языками программирования для разработки приложений для Android являются Java и Kotlin. Java – традиционный язык программирования для Android, в то время как Kotlin – это современная альтернатива, которая обеспечивает эффективность и удобство для разработчиков. Android Studio служит интегрированной средой разработки (IDE), специально разработана для создания приложений для Android. Она поддерживает оба основных языка программирования, Java и Kotlin, и предоставляет разработчикам необходимые инструменты для разработки и отладки приложений. Кроме того, для сценариев, требующих максимальной производительности, доступен Native Development Kit (NDK). Разработка программного обеспечения для Android Kit (SDK) предлагает инструменты и ресурсы для разработки приложений, тестирования и документации для Android. Он также включает в себя эмуляторы для тестирования приложений на различных устройствах и версиях Android (Sun, C., Ma, Y., Zeng, D., Tan, G., Ma, S., & Wu, Y., 2021) [14]. Все эти компоненты инфраструктуры разработки приложений для Android позволяют разработчикам создавать эффективные и надежные приложения для различных устройств, работающие на оптимальном уровне производительности и использующие мощные возможности платформы Android.

Разработка нативных мобильных приложений имеет несколько ключевых особенностей, отличающих его от других подходов к разработке. Одним из главных преимуществ является возможность использовать весь потенциал базовой операционной системы и аппаратного обеспечения устройства. Собственные приложения имеют прямой доступ к специфичным для устройства функциям и API (интерфейсам прикладного программирования), что позволяет разработчикам создавать оптимизированные и продуктивные приложения. Такой уровень контроля позволяет разрабатывать многофункциональные и привлекательные пользовательские интерфейсы с плавной анимацией, быстрым откликом и доступ к расширенным функциональным возможностям (Dittrich, F., Albrecht, U.V., Scherer, J., Becker, S.L., Landgraeber, S., Back, D.A., Fessmann, K., ... Klietz, M.L., 2023) [3]. Еще одной ключевой особенностью разработки нативных приложений является возможность следовать конкретным рекомендациям по проектированию компонентов пользовательского интерфейса. Собственные приложения могут обеспечить согласованное взаимодействие с пользователем, придерживаясь принципов проектирования и шаблонов целевой операционной системы (Thamutharam, Y.N., Mustafa, M.B.P., Musthafa, F.N., & Tajudeen, F.P., 2021) [15]. Это гарантирует, что приложение выглядит и ощущается как родное для платформы, что повышает удобство работы и удовлетворенность пользователей.

Разработка нативных приложений также обеспечивает лучшую интеграцию с экосистемой устройств. Разработчики могут легко получить доступ к таким возможностям устройств, как камера, GPS, акселерометр и push-уведомления (Raeesi, A., Khaejouei, R., & Ahmadian, L., 2022) [12]. Это позволяет создавать приложения, которые могут в полной мере использовать потенциал устройства, предоставляя такие функции, как сервисы на основе определения местоположения, дополненная реальность и функциональность в режиме реального времени. Кроме того, по сравнению с другими подходами к разработке, нативные приложения обычно обеспечивают более высокую производительность. Поскольку они создаются с использованием нативных языков программирования и инструментов, с которыми они могут работать более эффективно. Однако разработка

нативных приложений также имеет ограничения и проблемы. Одним из основных недостатков является необходимость разработки отдельных кодовых баз для каждой целевой платформы (Masaad Alsaid, M.A.M., Ahmed, T.M., Sadeeq, J., Khan, F.Q., Mohammad, & Khattak, A.U., 2021) [11]. Это может увеличить время разработки и затраты. Кроме того, обновления и исправления ошибок могут потребовать отдельного развертывания для каждой платформы, что приведет к увеличению затрат на техническое обслуживание.

Платформы для разработки гибридных мобильных приложений. Гибридная разработка мобильных приложений позволяет разработчикам создавать мобильные приложения с использованием технологий веб-разработки, таких как HTML, CSS и JavaScript. Этот метод сочетает в себе преимущества других подходов и предлагает компромисс между нативными приложениями и веб-приложениями, позволяя создавать приложения, которые одновременно обеспечивают высокую функциональность для конкретной платформы и совместимость с различными платформами (Wu, C., Pérez-Álvarez, J.M., Mos, A., & Carroll, J.M.) [18].

Одним из самых популярных инструментов для гибридной разработки является Apache Cordova. Он инициализирует нативное приложение с помощью WebView, встроенного веб-браузера. Он служит связующим звеном между нативным кодом и веб-компонентами приложения, позволяя разработчикам писать бизнес-логику в JavaScript и создавать пользовательские интерфейсы с использованием HTML и CSS. Такой подход позволяет разрабатывать приложения, которые могут работать на различных платформах, включая Android и iOS, используя единую кодовую базу. Гибридные платформы разработки приложений предоставляют широкий спектр функций и возможностей для упрощения процесса разработки. Эти фреймворки часто включают компоненты и библиотеки, которые позволяют разработчикам создавать визуально привлекательные и быстрые пользовательские интерфейсы (Singh, M., & Shobha, G., 2021) [13]. Они также предоставляют доступ к функциям устройств и API-интерфейсам с помощью плагинов, позволяя разработчикам использовать встроенную функциональность в своих гибридных приложениях.

Помимо Apache Cordova, другие популярные гибридные фреймворки включают Ionic (который использует Angular) и React Native (основанный на React). Каждый из этих фреймворков обладает своими уникальными функциями и приложениями (табл.1), что позволяет разработчикам выбирать тот, который наилучшим образом соответствует их потребностям.

Таблица 1. Сравнительные характеристики популярных гибридных фреймворков
Table 1. Comparative characteristics of popular hybrid frameworks

Фреймворк Framework	Описание Description	Языки программирования Programming Languages	Основные характеристики Main Features
Apache Cordova	Использует веб-технологии для разработки мобильных приложений.	HTML, CSS, JavaScript	Поддерживает множество плагинов для расширения функциональности устройства
Ionic	Гибридный фреймворк, основанный на Angular. Разработан специально для создания красивых и функциональных мобильных приложений	HTML, CSS, JavaScript (с Angular)	Готовые компоненты и инструменты для пользовательского интерфейса
React Native	Позволяет использовать React для создания мобильных приложений с интерфейсом и функциональностью нативных приложений	JavaScript (с React)	Возможность повторного использования кода на разных платформах и высокая производительность.

Одним из главных преимуществ гибридной разработки является возможность использовать существующие навыки и ресурсы веб-разработчиков. Разработчики, владеющие веб-технологиями, могут легко перейти к гибридной разработке, поскольку они могут использовать свои знания HTML, CSS и JavaScript. Это может привести к сокращению сроков разработки и снижению затрат по сравнению с разработкой отдельных нативных приложений для каждой платформы. Однако гибридная разработка также имеет свои недостатки. Поскольку гибридные приложения используют WebView для отображения пользовательского интерфейса, они могут не обеспечивать такого же уровня производительности, как нативные приложения (Hu, J., Wei, L., Liu, Y., & Cheung, S.C., 2023) [5]. Кроме того, для доступа к определенным функциям устройства и API-интерфейсам может потребоваться использование подключаемых модулей, что создает дополнительную сложность и потенциальные проблемы с совместимостью. В целом, разработка гибридных мобильных приложений представляет собой компромисс между нативными и веб-приложениями. Это позволяет разработчикам создавать приложения для разных платформ с использованием веб-технологий, предоставляя доступ к функциональным возможностям устройств. Apache Cordova - популярный инструмент для гибридных приложений, разработка, позволяющая использовать HTML, CSS и JavaScript для создания приложений, которые могут работать на различных платформах. Хотя гибридные приложения могут отличаться производительностью от нативных приложений, они обладают преимуществами с точки зрения эффективности разработки и экономичности.

Разработка кроссплатформенных мобильных приложений – это современный подход в области программного обеспечения для мобильных устройств. Он предполагает создание приложений, которые могут работать на разных платформах, таких как Android и iOS, с использованием единой кодовой базы и других общих ресурсов. Кроссплатформенная разработка приобрела популярность благодаря возможности эффективного использования общего кода для создания приложений на разных платформах. Это позволяет разработчикам экономить время и ресурсы, избегая необходимости поддерживать отдельный код для каждой платформы. Основным преимуществом кроссплатформенной разработки является снижение затрат на разработку и обслуживание приложений, поскольку общий код может использоваться на всех платформах. Кроме того, разработчики могут использовать единый язык программирования для создания приложений.

Кроссплатформенные платформы, такие как Flutter, Xamarin и другие (табл. 2), предоставляют инструменты для разработки мобильных приложений, внешний вид и поведение которых аналогичны нативным приложениям на каждой платформе (Martínez, M., 2019) [10]. Это обеспечивает высокое качество и согласованную функциональность в различных операционных системах.

Таблица 2. Обзор популярных кроссплатформенных платформ
Table 2. Overview of popular cross-platform platforms

Фреймворк Framework	Языки программирования Programming Languages	Описание Description
Flutter	Dart	Фреймворк от Google для создания красивых мобильных приложений с единой кодовой базой и использованием собственного движка рендеринга.
Xamarin	C#	Фреймворк от Microsoft, позволяющий разработчикам использовать язык программирования C# для создания мобильных приложений для Android и iOS.
Appcelerator Titanium	JavaScript	Фреймворк, использующий JavaScript для разработки кроссплатформенных мобильных приложений и предоставляющий доступ к встроенным функциям.

Кроссплатформенные фреймворки для разработки мобильных приложений, предлагая такие преимущества, как унифицированная кодовая база и снижение затрат на разработку, также обладают рядом недостатков.

Во-первых, одним из основных недостатков является ограниченный доступ к встроенным функциям и API-интерфейсам платформы. Кроссплатформенные платформы пытаются абстрагировать функциональность устройства, но иногда они могут не полностью воспроизводить все возможности, доступные на конкретной платформе. Вторым недостатком является производительность и скорость.

Разработанные мобильные приложения с использованием кроссплатформенных платформ могут замедлить работу и потребовать больше ресурсов по сравнению с собственными приложениями. Кроме того, задержки с обновлениями могут привести к трудностям при использовании новых функций. Наконец, кроссплатформенные платформы могут быть не так хорошо адаптированы к специфическому внешнему виду и поведению определенных платформ, что может потребовать дополнительной настройки и адаптации. Таким образом, кроссплатформенные фреймворки, хотя и позволяют экономить время и ресурсы при разработке мобильных приложений, имеют ограничения и недостатки, которые необходимо учитывать при выборе подхода к разработке.

В современных условиях разработки мобильных приложений выбор оптимального подхода имеет решающее значение. Разработчики сталкиваются с различными возможностями и ограничениями при выборе между нативными, гибридными и кроссплатформенными решениями.

В табл. 3 представлен сравнительный анализ этих подходов к разработке. Нативные приложения отличаются высокой производительностью и скоростью благодаря использованию нативных компонентов и языков программирования для каждой платформы в отдельности. Для разработки нативных приложений на платформе Android используются такие языки программирования, как Java или Kotlin, в то время как на платформе iOS используются Swift или Objective-C. Такой подход обеспечивает полный доступ ко всем возможностям устройства и встроенным API, позволяющие создавать приложения с отличной производительностью и скоростью. Однако для этого требуется больше ресурсов и времени на разработку. Необходимость в отдельном коде для каждой платформы приводит к увеличению затрат и продолжительности проекта.

С другой стороны, гибридные приложения позволяют сократить затраты и время разработки за счет использования единой кодовой базы для обеих платформ. Они часто полагаются на веб-технологии, такие как HTML, CSS и JavaScript, что упрощает разработку для опытных веб-разработчиков. Одной из популярных платформ для гибридной разработки является Apache Cordova, которая инициализирует нативное приложение с помощью WebView, встроенного веб-браузера. Гибридные приложения могут демонстрировать более низкую производительность из-за использования WebView и ограниченный доступ к возможностям устройства. Плагины могут использоваться для доступа к определенным функциям устройства, таким как камера или геолокация.

Кроссплатформенные приложения сочетают в себе преимущества обоих предыдущих подходов, позволяя использовать единую кодовую базу для обеих платформ. При правильном выборе кроссплатформенного фреймворка можно добиться удовлетворительной производительности. Одним из таких фреймворков является Flutter, разработанный Google, который использует язык программирования Dart и собственный движок для рендеринга пользовательского интерфейса. Еще одним популярным вариантом является фреймворк Xamarin от Microsoft, который позволяет использовать язык программирования C#. Кроссплатформенные приложения могут также использовать специализированные платформы для улучшения дизайна и внешнего вида приложений. Однако они могут выглядеть менее «нативно» и иметь ограниченный доступ к функциям, зависящим от платформы.

Таблица 3. Сравнительный анализ нативных, гибридных и кроссплатформенных решений для разработки мобильных приложений

Table 3. Comparative analysis of native, hybrid and cross-platform solutions for mobile application development

Параметр Parameter	Нативные приложения Native applications	Гибридные приложения Hybrid applications	Кроссплатформенные приложения Cross-platform applica-tions
Производительность и скорость	Высокая производительность, оптимизированная скорость работы с использованием собственных компонентов и языков программирования Java/Kotlin для Android, Swift/Objective-C для iOS.	Умеренная производительность и скорость благодаря использованию WebView для отображения пользовательского интерфейса и некоторой абстракции.	Производительность умеренная, но может быть улучшена с помощью специализированных кроссплатформенных платформ (например, Flutter).
Стоимость и время разработки	Высокие затраты и более длительное время разработки из-за необходимости создавать отдельный код для каждой платформы.	Снижение затрат и ускорение разработки благодаря использованию единой кодовой базы для обеих платформ. Некоторые приложения могут потребовать корректировки для конкретной платформы.	Более низкие затраты и меньше времени, но разработка может занять немного больше времени по сравнению с гибридными решениями из-за выбора кроссплатформенной платформы и обучения команды.
Доступ к возможностям устройства	Полный доступ ко всем возможностям устройства и встроенным API.	Ограниченный доступ, требует использования плагинов для доступа к определенным функциям устройства.	Средний доступ; кроссплатформенные платформы предоставляют API для упрощенного доступа к возможностям устройств, но не всегда могут обладать полным набором функций.
Внешний вид	Оригинальный внешний вид на каждой платформе обеспечивает высокое качество и безупречный дизайн.	Менее привычный внешний вид; интерфейс может быть менее привлекательным и в меньшей степени соответствовать стандартам дизайна каждой платформы.	Как правило, менее привычный внешний вид, но возможность использовать специализированные фреймворки для улучшения дизайна.
Поддержка платформы	Зависит от платформы (Android и iOS).	Обе платформы (Android и iOS) основаны на единой кодовой базе.	Обе платформы (Android и iOS) основаны на единой кодовой базе
Обновления и поддержка	Отдельно для каждой платформы, отдельно для обновлений и обслуживания.	Обновления и техническое обслуживание из одной кодовой базы, но может возникнуть необходимость в обновлениях для каждой ОС (операционной системы) отдельно для поддержки новых функций платформы.	Обновления и обслуживание из единой кодовой базы, возможность дополнительной работы по поддержке новых функций.

Вывод. В ходе исследования были рассмотрены различные подходы к разработке мобильных приложений, такие как нативные, гибридные и кроссплатформенные решения. Нативные приложения, разработанные для конкретной платформы, обеспечивают высочайшую производительность и доступ к возможностям устройства, но требуют значитель-

ных усилий и ресурсов. Гибридные приложения сокращают затраты и время за счет использования общей кодовой базы, но могут иметь ограниченный доступ к функциям устройства. Кроссплатформенные приложения, сочетающие преимущества обоих подходов, могут быть эффективными благодаря правильному выбору фреймворка.

В ходе исследования были проанализированы различные фреймворки для разработки мобильных приложений, включая Flutter, Xamarin, Apache Cordova, React Native и Ionic. У каждого из них есть свои особенности и преимущества. Flutter, разработанный Google, позволяет создавать приложения с высококачественным интерфейсом и высокой производительностью с помощью единой кодовой базы. Xamarin от Microsoft использует язык программирования C# и интегрируется с экосистемой Microsoft. Apache Cordova основан на веб-технологиях и инициализирует нативное приложение через WebView. React Native от Facebook позволяет создание приложений с нативным дизайном и быстрым кодированием с использованием React и JavaScript. Ionic использует HTML, CSS и JavaScript для гибридной разработки с возможностью использования Angular. Результаты исследования показывают, что выбор фреймворка должен основываться на конкретных требованиях к проекту с учетом производительности, бюджета и ресурсов. Каждый фреймворк имеет свои преимущества и ограничения, и важно учитывать их в контексте конкретного проекта. Рекомендации включают выбор подхода к разработке мобильного приложения на основе конкретных требований к проекту, финансовых ограничений и ресурсов.

Библиографический список:

1. Альрабайя, Х.А., и Медина-Медина, Н. (2021). Agile beeswax: процесс разработки мобильных приложений и эмпирическое исследование в реальной среде. Устойчивое развитие, 13(4), artikel 1909. DOI: 10.3390/su13041909.
2. Бьерн-Хансен А., Ригер К., Гренли Т.М., Майчшак Т.А. и Гинея Г. (2020). Эмпирическое исследование повышения производительности кроссплатформенных платформ мобильной разработки. Эмпирическая разработка программного обеспечения, 25, 2997-3040. DOI: 10.1007/s10664-020-09827-6.
3. Дитрих Ф., Альбрехт У.В., Шерер Дж., Беккер С.Л., Ландграбер С., Бэк Д.А., Фессманн К., ... Клиц, М.Л. (2023). Разработка открытых серверных структур для медицинских работников с целью улучшения участия в разработке приложений: пилотное исследование удобства использования медицинского приложения. JMIR Formative Research, 7, номер статьи e42224. DOI:10.2196/42224.
4. Фойтик Р. (2019). Swift - новый язык программирования для разработки и образования. В работе Т. Антиповой и А. Роша (ред.), Digital Science 2019 (том 1114; стр. 284-295). Издательство: Springer. DOI: 10.1007/978-3-030-37737-3_26.
5. Ху, Дж., Вэй, Л., Лю, Ю. и Чунг, С.К. (2023). wTest: Webview-ориентированное тестирование приложений для Android. В ISSTA 2023: Материалы 32-го международного симпозиума ACM SIGSOFT по тестированию и анализу программного обеспечения (стр. 992-1004). Нью-Йорк: Ассоциация вычислительной техники. DOI: 10.1145/3597926.3598112.
6. Качмарчик А., Зайенц П. и Забьеровский В. (2022). Сравнение производительности нативных и гибридных мобильных приложений Android, основанных на сенсорных данных, основанных на коммуникационной архитектуре Bluetooth с низким энергопотреблением (BLE) и Wi-Fi. Energies, 15(13), artikel 4574. DOI: 10.3390/en15134574.
7. Карапанов О., Йена М., Бова Ю., Устименко О. (2021). Сравнение популярных тестовых фреймворков JUnit и TestNG. Молодой ученый, 5(93), 164-170. DOI: 10.32839/2304-5809/2021-5-93-31.
8. Козуб, Н., & Козуб, Ю. (2022). Декларативный метод создания мультиплатформенных приложений. Вестник Восточноукраинского национального университета имени Владимира Даля, 5(275), 10-15. DOI: 10.33216/1998-7927-2022-275-5-10-15.
9. Лачгар, М., Ханин, М., Бенуда, Х. и Омман, Ю. (2022). Система принятия решений для кроссплатформенных платформ мобильной разработки, использующая интегрированную методологию принятия многокритериальных решений. Международный журнал мобильных вычислений и мульти-медийных коммуникаций, 13 (1), 1-22. DOI: 10.4018/ijmcmc.297928.
10. Мартинес, М. (2019). Два набора вопросов и ответов для изучения разработки кроссплатформенных мобильных приложений с использованием платформы Xamarin framework. В 2019 году состоится 6-я международная конференция IEEE/ACM по разработке мобильного программного обеспечения

- и систем (MOBILESoft) (стр. 162-173). Пискатауэй: Институт инженеров электротехники и электроники. DOI: 10.1109/mobilesoft.2019.00032.
11. Масаад Альсаид, М.А.М., Ахмед, Т.М., Садик, Дж., Хан, Ф.К., Мохаммад и Хаттак, А.У. (2021). Сравнительный анализ подходов к разработке мобильных приложений: Подходы к разработке мобильных приложений. Труды Пакистанской академии наук: А. Физические и вычислительные науки, 58 (1), 35-45. DOI: 10.53560/PPASA(58-1)717.
 12. Раиси, А., Хаджун, Р. и Ахмадиан, Л. (2022). Оценка и ранжирование мобильных приложений для борьбы с ВИЧ/СПИДом с использованием метода оценки приложений на основе функций и шкалы оценки мобильных приложений. BMC Medical Informatics and Decision Making, 22, статья № 281. DOI: 10.1186/s12911-022-02029-8.
 13. Сингх, М., и Шобха, Г. (2021). Сравнительный анализ платформ разработки гибридных мобильных приложений. Международный журнал мягких вычислений и инженерии, 10 (6), 21-26. DOI: 10.35940/ijsece.f3518.0710621.
 14. Sun, C., Ma, Y., Zeng, D., Tan, G., Ma, S., & Wu, Y. (2021). μDep: Генерация зависимостей на основе мутаций для точного анализа дефектов в машинном коде Android. В IEEE transactions on dependable and secure computing, 20 (2), 1461-1475. Пискатауэй: Институт инженеров электротехники и электроники. DOI: 10.1109/TDSC.2022.3155693.
 15. Тамутарам Ю.Н., Мустафа М.Б.П., Мустафа Ф.Н. и Таджудин Ф.П. (2021). Функции юзабилити для улучшения восприятия мобильных приложений пожилыми гражданами Малайзии. Научный журнал ASM, 16. DOI: 10.32802/asmsc.2021.686.
 16. Ткачук А., Булах Б. (2022). Исследование возможностей действий по рефакторингу по умолчанию в языке swift. Технологический аудит и резервы производства, 5(2(67)), 6-10. DOI: 10.15587/2706-5448.2022.266061.
 17. Upchurch, S.R., Denge, США, Bajoriya, A.S. и Bachwani, S.A. (2022). Обзор подробной информации о кросс-платформе flutter. Международный журнал исследований в области прикладных наук и инженерных технологий, 10 (1), 1016-1022. DOI: 10.22214/ijraset.2022.39977.
 18. Ву, К., Перес-Альварес, Дж.М., Мос, А., и Кэрролл, Дж.М. (2022). Разработка приложений без кода: оценка подхода к облачным функциям с учетом специфики предметной области. В материалах 56-й ежегодной Гавайской международной конференции по системным наукам, HICSS 2023 (стр. 6904-6913). Вашингтон: Компьютерное общество IEEE. DOI: 10.48550/arxiv.2210.01647.
 19. Зиедуллаевич А.К., Бабакулович З.Р., Баходировна М.З., Бекмуродович С.А. и Акиф-оглы М.Р. (2019). Эффективное и удобное приложение для определения функций и анализа надежности устройства. Международный журнал инновационных технологий и инженерных исследований, 9 (2), 1804-1809. DOI: 10.35940/ijitee. b7323.129219.
 20. Зохуд, Т., и Зейн, С. (2021). Разработка кроссплатформенных мобильных приложений в промышленности: несколько примеров из практики.

References:

1. Alrabaiah, H.A., & Medina-Medina, N. (2021). Agile beeswax: Mobile app development process and empirical study in real environment. Sustainability, 13(4), article number 1909. DOI: 10.3390/su13041909.
2. Biørn-Hansen, A., Rieger, C., Grønli, T.M., Majchrzak, T.A., & Ghinea, G. (2020). An empirical investigation of performance overhead in cross-platform mobile development frameworks. Empirical Software Engineering, 25, 2997-3040. DOI: 10.1007/s10664-020-09827-6.
3. Dittrich, F., Albrecht, U.V., Scherer, J., Becker, S.L., Landgraeben, S., Back, D.A., Fessmann, K., ... Klietz, M.L. (2023). Development of open backend structures for health care professionals to improve participation in app developments: Pilot usability study of a medical app. JMIR Formative Research, 7, article number e42224. DOI: 10.2196/42224.
4. Fojtik, R. (2019). Swift a new programming language for development and education. In T. Antipova & Á. Rocha (Eds.), Digital Science 2019; 1114: 284-295). Cham: Springer. DOI: 10.1007/978-3-030-37737-3_26.
5. Hu, J., Wei, L., Liu, Y., & Cheung, S.C. (2023). oTest: Webview-oriented testing for android applications. In ISSTA 2023: Proceedings of the 32nd ACM SIGSOFT international symposium on software testing and analysis 2023:992-1004). New York: Association for Computing Machinery. DOI: 10.1145/3597926.3598112.
6. Kaczmarczyk, A., Zając, P., & Zabierowski, W. (2022). Performance comparison of native and hybrid android mobile applications based on sensor data-driven applications based on Bluetooth low energy (BLE) and Wi-Fi communication architecture. Energies, 15(13), article number 4574. DOI: 10.3390/en15134574.
7. Karatanov, O., Yena, M., Bova, Y., & Ustymenko, O. Comparison of popular test frameworks JUnit and TestNG. Young Scientist, 2021:5(93), 164-170. DOI: 10.32839/2304-5809/2021-5-93-31. (In Russ)

8. Kozub, H., & Kozub, Yu. (2022). Declarative method for creating multiplatform applications. Bulletin of the Eastern Ukrainian National University named after Volodymyr Dahl, 5(275), 10-15. DOI: 10.33216/1998-7927-2022-275-5-10-15.
9. Lachgar, M., Hanine, M., Benouda, H., & Ommane, Y. (2022). Decision framework for cross-platform mobile development frameworks using an integrated multi-criteria decision-making methodology. International Journal of Mobile Computing and Multimedia Communications, 13(1), 1-22. DOI: 10.4018/ijmcmc.297928.
10. Martínez, M. (2019). Two datasets of questions and answers for studying the development of cross-platform mobile applications using Xamarin framework. In 2019 IEEE/ACM 6th international conference on mobile software engineering and systems (MOBILESoft) (pp. 162-173). Piscataway: Institute of Electrical and Electronics Engineers. DOI: 10.1109/mobilesoft.2019.00032.
11. Masaad Alsaid, M.A.M., Ahmed, T.M., Sadeeq, J., Khan, F.Q., Mohammad, & Khattak, A.U. (2021). A comparative analysis of mobile application development approaches: Mobile application development approaches. Proceedings of the Pakistan Academy of Sciences: A. Physical and Computational Sciences, 58(1), 35-45. DOI: 10.53560/PPASA(58-1)717.
12. Raeesi, A., Khajouei, R., & Ahmadian, L. (2022). Evaluating and rating HIV/AIDS mobile apps using the feature-based application rating method and mobile app rating scale. BMC Medical Informatics and Decision Making, 22, article number 281. DOI: 10.1186/s12911-022-02029-8.
13. Singh, M., & Shobha, G. (2021). Comparative analysis of hybrid mobile app development frameworks. International Journal of Soft Computing and Engineering, 10(6), 21-26. DOI: 10.35940/ijscce.f3518.0710621.
14. Sun, C., Ma, Y., Zeng, D., Tan, G., Ma, S., & Wu, Y. (2021). μ Dep: Mutation-based dependency generation for precise taint analysis on android native code. In IEEE transactions on dependable and secure computing, 2021;20(2):1461-1475. Piscataway: Institute of Electrical and Electronics Engineers. DOI: 10.1109/TDSC.2022.3155693.
15. Thamutharam, Y.N., Mustafa, M.B.P., Musthafa, F.N., & Tajudeen, F.P. (2021). Usability features to improve mobile apps acceptance among the senior citizens in Malaysia. ASM Science Journal, 16. DOI: 10.32802/asmscj.2021.686.
16. Tkachuk, A., & Bulakh, B. (2022). Research of possibilities of default refactoring actions in swift language. Technology Audit and Production Reserves, 2022;5(2(67)):6-10. DOI: 10.15587/2706-5448.2022.266061.
17. Uplenchwar, S.R., Denge, U.S., Bajoriya, A.S., & Bachwani, S.A. (2022). Review on detail information about flutter cross platform. International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology, 2022;10(1):1016-1022. DOI: 10.22214/ijraset.2022.39977.
18. Wu, C., Pérez-Álvarez, J.M., Mos, A., & Carroll, J.M. (2022). Codeless app development: Evaluating a cloud-native domain-specific functions approach. In Proceedings of the 56th annual Hawaii international conference on system sciences, HICSS 2022:6904-6913). Washington: IEEE Computer Society. DOI: 10.48550/arxiv.2210.01647.
19. Ziyodullayevich, A.Q., Babakulovich, Z.R., Bakhodirovna, M.Z., Bekmurodovich, S.A., & Akif-ogli, M.R. (2019). Efficient and convenient application to determine the functions and analysis of the reliability of the device. International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering, 2019;9(2):1804-1809. DOI: 10.35940/ijitee. b7323.129219.
20. Zohud, T., & Zein, S. (2021). Cross-platform mobile app development in industry: A multiple case-study.

Сведения об авторе:

Темирова Аза Бароновна, старший преподаватель кафедры «Информационные технологии», aza0109@mail.ru; ORCID - 0000-0003-1090-5180

Information about author:

Aza B. Temirova, Senior lecturer, Department of Information Technology, aza0109@mail.ru; ORCID - 0000-0003-1090-5180

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 02.10.2024.

Одобрена после рецензирования/Reviced 30.11.2024.

Принята в печать/Accepted for publication 19.01.2025.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 004.056.53



DOI: 10.21822/2073-6185-2025-52-1-134-146

Оригинальная статья /Original article

Механизм восстановления данных в результате их повреждения, заражения и/или несанкционированного изменения

Л.В. Черкесова, В.А. Савельев, Е.А. Ревякина, А.Р. Полулях, М.А. Семенцов

Донской государственный технический университет,
344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является программный анализ методов хэширования, сжатия и восстановления информации и разработка на этой основе модуля программного комплекса. **Метод.** В ходе исследования применены алгоритмы хэширования.

Результат. Представлен возможный функционал программного средства и организованные механизмы проверки целостности путём использования хэш-таблиц и восстановления файла из резервной копии. Модуль программного комплекса использует разработанный алгоритм, позволяющий устраниить уязвимости, связанные с целостностью программы, а также значительно снизить влияние вредоносных алгоритмов на целостность файлов. Для разработанного программного средства проводится сравнительный анализ с имеющимися аналогами, а также графическое представление работоспособности алгоритма, показывающее зависимость времени от количества файлов. Для разработки программного модуля был выбран реверсивный инкрементальный алгоритм резервного копирования, как наиболее подходящий для разработанного алгоритма и более удобный в использовании. **Вывод.** Предложенный механизм восстановления данных является современным решением, обеспечивающим сохранность личных файлов в случае их повреждения. Для будущего улучшения программного средства определены основные задачи: расширение функционала программного средства; оптимизация программного кода для достижения большего быстродействия; обновление и улучшение модулей программного средства; добавление функций копирования образа диска.

Ключевые слова: хэширование, восстановление, механизм, защита, хэш-функции, SHA, RLE

Для цитирования: Л.В. Черкесова, В.А. Савельев, Е.А. Ревякина, А.Р. Полулях, М.А. Семенцов. Механизм восстановления данных в результате их повреждения, заражения и/или несанкционированного изменения. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025; 52(1):134-146. DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-1-134-146

Mechanism for data recovery as a result of data corruption, infection and/or unauthorized modification

L.V. Cherkesova, V.A. Savelyev, E.A. Revyakina, A.R. Polulyakh, M.A. Sementsov
Don State Technical University,
1 Gagarin Square, Rostov-on-Don 344000, Russia

Abstract. Objective. The objective of the study is software analysis of hashing, compression and recovery methods and development of a software module on this basis. **Method.** Hashing algorithms were used in the study. **Result.** The possible functionality of the software tool and organized integrity checking mechanisms by using hash tables and restoring a file from a backup copy are presented. The software module uses the developed algorithm that allows eliminating vulnerabilities associated with program integrity, as well as significantly reducing the impact of malicious algorithms on file integrity. A comparative analysis with existing analogs is carried out for the developed

software tool, as well as a graphical representation of the algorithm's performance, showing the dependence of time on the number of files. To develop the software module, a reversible incremental backup algorithm was chosen as the most suitable for the developed algorithm and more convenient to use. **Conclusion.** The proposed data recovery mechanism is a modern solution that ensures the safety of personal files in case of their damage. The main tasks for future improvement of the software tool have been defined: expanding the functionality of the software tool; optimizing the program code to achieve greater performance; updating and improving the software modules; adding disk image copy functions.

Keywords: hashing, recovery, mechanism, protection, hash-function, SHA, RLE

For citation: L.V. Cherkesova, V.A. Savyelyev, E.A. Revyakina, A.R. Polulyakh, M.A. Sementsov. Mechanism for data recovery as a result of data corruption, infection and/or unauthorized modification. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2025; 52(1):134-146. (In Russ) DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-1-134-146.

Введение. В настоящее время существует огромное количество вредоносных программ, нацеленных на повреждение файлов, хранящихся на серверах и компьютерах. Проблема повреждения целостности файлов является одной из главных проблем неработающих программ и нечитаемых файлов, которые были повреждены в результате какой-либо атаки или их целостность нарушена по каким-либо другим причинам.

Стоит отметить, что проблема повреждения целостности, безусловно, рассматривается ведущими компаниями, но нет полной гарантии, что у файлов в системе, на сервере или в личной папке не будет нарушена целостность. Для таких целей используется резервное копирование, называемое сжатием и восстановлении информации. С момента появления первых методов хэширования и прошло довольно большое количество времени, но это не значит, что они не улучшаются – каждый последующий алгоритм, как правило, ускоряет время, необходимое для составления хэш-функции файла и усложняет структуру алгоритма во избежание повторения составленной хэш-функции.

В большинстве случаев, хэш-функция используется для создания сравнения контрольных сумм, цифровой подписи или создания уникальных идентификаторов. Крайне важно отметить, что алгоритмы сжатия и восстановления данных необходимы для создания резервных копий файлов, которые позволяет сохранить данные в случае их повреждения, будь то повреждения системы, несанкционированный доступ или намеренное воздействие вредоносных программ.

Постановка задачи. Целью исследования является программный анализ методов хэширования, сжатия и восстановления информации и разработка на этой основе модуля программного комплекса.

Методы исследования. Хэширование – это преобразование некоторого массива данных динамического размера в строку фиксированного размера, для этого используются алгоритмы хэширования или так называемые хэш-функции.

Хэширование можно применять в различных ситуациях. Алгоритм хэширования – это некоторая функция, которая на вход получает битовую строку, и на выходе выдаёт тоже битовую строку, хэш-код, но значительно меньшую по своим размерам. Однако, данный процесс необратимый, что означает – восстановление информации из хэш-кода не представляется возможным. Несмотря на такой большой минус, хэш-функции имеют значительный ряд применений, активно используемый в нынешнее время: создание уникальных идентификаторов; поиск дубликатов в наборах данных; вычисление контрольных сумм; хранение паролей; и т.д.;

В данном программном модуле, входящем в состав программного комплекса «BadCoreGuard», основное применение хэш-функции заключается в использовании контрольной суммы для содержимого файла. Стоит отметить, что крайне важным свойством

хэш-кода, что даже при незначительном изменение входной строки происходят значительные изменения выходной, из-за чего полученная хэш-функция будет отличаться от первоначальной.

Однако у хэш-кодов присутствует изъян – коллизии, ситуация, возникающая, когда при разных входных строках на выходе получается одна и та же выходная. Появление коллизии является лишь вопросом времени и зависит от используемого алгоритма хэш-функции, ведь чем больше бит используется и чем сложнее хэш-функция, тем меньше вероятность коллизии, не говоря уже о возможности решения коллизий с помощью специально созданных для этого различных методов.

На рис. 1 представлен один из вариантов решения коллизий с помощью хэш-таблиц в PHP5. Для данного программного модуля коллизии являются незначительными, так как не влияют на работоспособность самой программы.

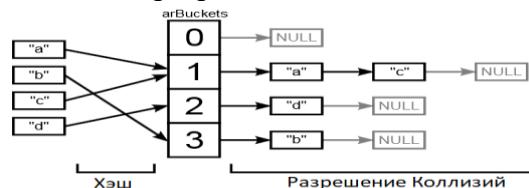


Рис. 1 – Решение коллизий с помощью хэш-таблицы

Fig. 1 – Collision resolution using a hash table

Для программного модуля было необходимо рассмотреть более подходящий алгоритм создания хэш-функций, удовлетворяющий некоторыми параметрами, такими как быстродействие, большое количество вариаций составленных хэш-функций, а также надёжность выбранного алгоритма. В данном случае, надёжность можно определить по рекомендации специализированных институтов и результатам проводимых конкурсов, а быстродействие и большое количество вариаций должны быть уравновешены.

На выбор были представлены несколько алгоритмов хеширования в свободном доступе:

- серия алгоритмов хэш-функций, принадлежащие семейству MD, разработанные Рональдом Л. Ривестом, что используются преимущественно для хранения паролей или создания уникальных криптографических ключей и ЭЦП. Несмотря на свою известность, последний алгоритм семейства MD – MD5 [1], созданный ещё в 1991 году, достаточно уязвим к некоторым атакам и не желателен для использования. Криптографический алгоритм представлен на рис. 2.

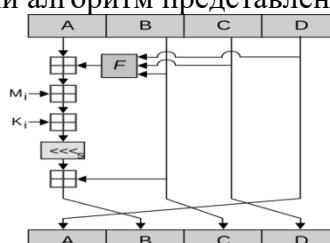


Рис. 2 – Криптографический алгоритм MD5

Fig. 2 – Cryptographic algorithm MD5

- алгоритм CRC, так называемый полином циклической проверки излишков, который является алгоритмом нахождения контрольной суммы, имеет большое количество вариаций и применяется для обнаружения ошибок в потоке информации. Данный алгоритм не является криптографическим и несмотря на его быстродействие, он не подходит для создания безопасных хэш-функций. Основной функцией алгоритма является обнаружение ошибок при передаче данных [2]. Алгоритм работы CRC в приложениях заключается в следующем – при передаче сообщения, получатель принимает не только само сообщение, но и контрольную сумму, которую затем алгоритм на стороне получателя получает из полученного

сообщения и в случае расхождения контрольных сумм можно удостовериться, что сообщение либо повреждено, либо изменено намерено.

- алгоритм Whirlpool – разработанный в 2000 году Винсентом Рэймоном и Пауло Баррето на входе принимает строку в 2^{256} бит, а на выходе выдаёт 512 бит. Считается криптографически стойким, широко применяемым алгоритмом хэш-функции. Несмотря на надёжность, для используемого программного комплекса данный алгоритм будет излишним.
- алгоритм MurmurHash считается довольно быстрой и эффективной, пусть и не является криптографической хэш-функцией, но всё же широко используется в различных целях, хоть и не рекомендован для использования в целях безопасности из-за уязвимости к коллизионным атакам.
- алгоритмы BLAKE2, доступны в сразу двух версиях, BLAKE2b и BLAKE2s, где первый алгоритм оптимизирован для 64-разрядных платформ и выдаёт хэш-функции до 512 бит, в то время как вторая версия оптимизирована для 32-разрядных платформ и может выдавать хэш-функции до 256 бит. Сама по себе хэш-функция BLAKE2 разработана для обеспечения скорости и безопасности, что сравнимо с улучшением популярного алгоритма SHA-3, а также активно применяется в приложениях, требующих высокоскоростного хэширования, как, например, создание криптовалюты. Алгоритм BLAKE представлен на рис. 3.

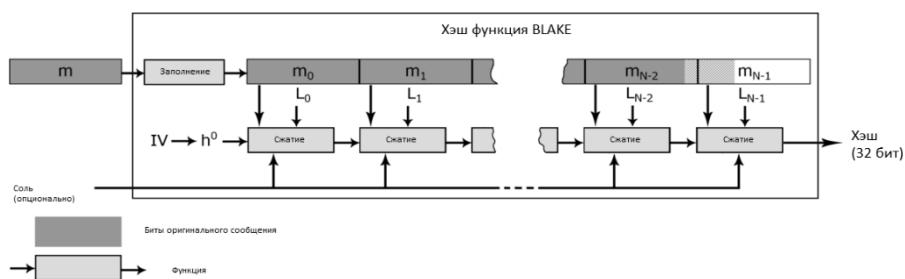


Рис. 3 – Криптографический алгоритм BLAKE
 Fig. 3 – Cryptographic algorithm BLAKE

- алгоритмы семейства SHA, так называемый безопасный алгоритм хэширования – являются семейством криптографических хэш-функций, принимающих сообщение и вычисляющих хэш-код фиксированной длины. Разработаны АНБ США, а затем прошедшие публикацию NIST (Национальный институт стандартов и технологий).

По сравнению с другими алгоритмами, существует четыре «поколения» алгоритмов хэш-функций, принадлежащих семейству SHA: SHA-0 – исходная версия 160-битной хэш-функции, опубликованной в 1993 году; SHA-1 – исправленная версия предыдущего алгоритма, опубликованная в 1995 году, но в нём также была найдена уязвимость, в результате чего к нему потеряли доверие; SHA-2 – набор криптографических хэш-функций, опубликованный в 2001 году и рекомендованный NIST к применению в новых системах, при этом включающий в себя различные модификации, отвечающие за различные размеры ключа; SHA-3 – последняя версия алгоритма семейства SHA, выбранная в 2012 году после проведённого конкурса, при этом поддерживает те же длины хэш-кода, что и SHA-1 и SHA-2, но при этом представляет собой совершенно новый алгоритм, считающийся более безопасным. Несмотря на существование более новых алгоритмов, сейчас также активно используются разновидности SHA-2, под названием SHA-256 [3] и SHA-512, отличающиеся размером выходной строки, соответственно на 32 бита и 64 бита.

Общая схема криптографического алгоритма SHA-256 представлена на рис. 4.

В данном программном модуле используется SHA-256, как наиболее оптимальный, из-за его достаточно высокой скорости, стойкости и относительно небольших размерах. Содержится в стандартной библиотеке для языка программирования «Python», под назва-

нием «hashlib». Сжатие файла – это процесс, в ходе которого файл большого размера преобразуется в файл меньшего размера.

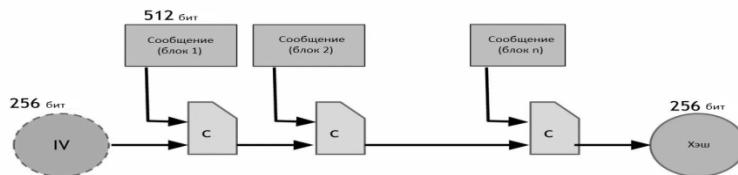


Рис. 4 – Криптографический алгоритм SHA-256
Fig. 4 – Cryptographic algorithm SHA-256

Существует два способа сжатия – с потерями и без потерь. Сжатие с потерями, как понятно из названия, это – сжатие, в результате которого часть информации, в основном незначительная, теряется. Данным методом сжимают аудио, видео и графические файлы, где потери информации не являются существенными. Сжатие без потерь, соответственно, сжимает файл без потери информации, благодаря чему информация файла не теряется. В данном программном комплексе используется сжатие без потерь информации.

Несмотря на свою многочисленность, алгоритмы сжатия не могут похвастаться таким же разнообразием, и часто используемые алгоритмы представлены в основном семейством LZ и его многочисленными модификациями. Например, такие как LZ77, строение которого разобрано в статье [4], или же LZ78, или LZW. Однако потребность сжимать всё большие объёмы данных требуют разработки новых и новых алгоритмов сжатия данный вопрос рассматривается в статьях [5] и [6], но несмотря на это все они до сих пор основываются на RLE, чей алгоритм представлен в виде примера с числами на рис. 5.



Рис. 5 – Принцип алгоритма RLE на примере последовательности чисел
Fig. 5 – The principle of the RLE algorithm using a sequence of numbers as an example

В данном программном комплексе «BadCoreGuard» используется встроенный алгоритм из стандартного набора библиотек языка программирования «Python», под названием «zlib», алгоритм которой также основан на RLE.

Существует несколько видов резервного копирования, у каждого из которых имеются свои недостатки и особенности, что могут использоваться повсеместно или в каких-нибудь определённых условиях. Различные разработки, а, следовательно, и компании, предпочитают определённые механизмы создания резервных копий, или же алгоритмов восстановления данных. Можно выделить пять наиболее популярных механизмов [7], среди которых выделяются традиционные [8], а также новые алгоритмы.

Полное резервное копирование – это алгоритм, который создаёт абсолютную копию исходных файлов, из-за чего считается одним из лучших для защиты данных, благодаря простоте и относительно высокой скорости восстановления. Однако, из-за больших размеров резервных копий восстановление данных занимает довольно много времени, кроме того, сохранение предыдущих образов требует соответствующих объёмов хранилищ. Также стоит отметить, что создание полной резервной копии создаёт сильные нагрузки на сетевой трафик в случае облачного хранилища. Кроме того, в случае повреждения резервной копии, ущерб будет нанесён всем файлам. Общий алгоритм полного резервного копирования представлен на рис. 6.

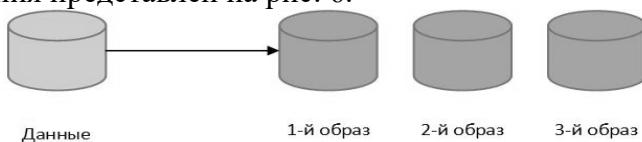


Рис. 6 – Алгоритм полного резервного копирования
Fig. 6 – Full backup algorithm

Инкрементальное резервное копирование – данный алгоритм (представленный на рис. 7) сокращает нагрузку на сеть и затрачиваемое количество времени, необходимое для создания резервной копии. В основе алгоритма лежит создание полного образа данных, после чего в него записываются только те блоки данных, которые изменились с момента создания резервной копии.



Рис. 7 – Алгоритм инкрементального резервного копирования
Fig. 7 – Incremental backup algorithm

Таким образом, сначала создаётся полный образ, а затем в него добавляются изменения, называемые инкрементами, прошедшие с последнего копирования, и так до создания очередного полного образа, что определяется политикой хранения резервных копий. Однако, у данного способа есть свои удобства и недостатки – несмотря на высокую скорость, по сравнению с полным резервным копированием, а также меньшим занимаемым пространством хранилища, процесс восстановления будет медленным из-за необходимости вернуться к изначальной резервной копии через каждый инкремент, что подразумевает в случае повреждения цепочки инкрементов восстановление данных может быть невозможно.

Дифференциальное резервное копирование – этот алгоритм является промежуточным решением между инкрементальным и полным алгоритмами резервного копирования. Аналогично инкрементальному, началом алгоритма является создание полной резервной копии, а затем внесение в неё изменений, но изменения вносятся не относительно последнего копирования, то есть с момента каждого инкремента, а относительно первоначально-го образа, что показано на рис. 8.

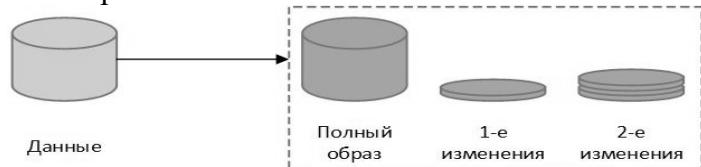


Рис. 8 – Алгоритм дифференциального резервного копирования
Fig. 8 – Differential backup algorithm

Благодаря такому подходу, данный алгоритм по сравнению с инкрементальным быстрее восстанавливается данные, но медленнее создаёт сами образы. Однако со временем, инкременты будут требовать всё больше и больше места и времени, в иных случаях превосходя даже полное резервное копирование.

Реверсивное инкрементальное резервное копирование – модификация инкрементального алгоритма, заключающийся в внедрении инкрементов к первоначальному полному образу, при этом сохраняя все замещаемые блоки, что позволяет восстановить предыдущие версии сохранённых данных. Из преимуществ можно выделить высокую скорость восстановления данных из резервной копии, так как в данном алгоритме используется последний полный образ данных. Данный алгоритм представлен на рис. 9.

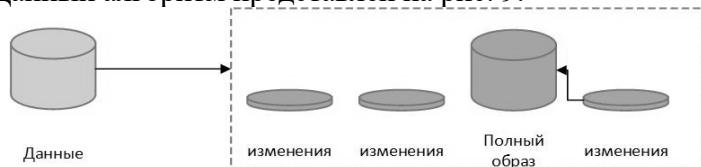


Рис. 9 – Алгоритм реверсивного инкрементального резервного копирования
Fig. 9 – Algorithm of reverse incremental backup

Синтетическое полное резервное копирование – является модификацией алгоритма реверсивного инкрементального резервного копирования, представлен на рис. 10. Созда-

ние синтетической полной резервной копии аналогично алгоритму реверсивного инкрементального, однако инкрементальные образы со временем объединяются и применяются к имеющемуся первоначальному первому образу, тем самым формируя резервную копию в качестве нового образа. Данный метод включает в себя все преимущества стандартных алгоритмов создания резервных копий, то есть обладает низкими требованиями к хранилищу, что позволяет более эффективно управлять пространством, создает низкие нагрузки на сеть, а также обеспечивает высокую скорость создания резервных копий и восстановления данных из формируемого образа. У данного алгоритма также имеется довольно серьёзный недостаток – высокая нагрузка на сервер резервного копирования, из-за чего его содержание может обходиться дороже.

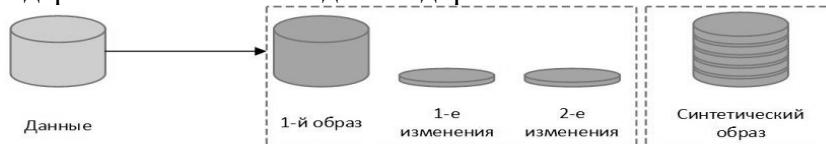


Рис. 10 – Алгоритм синтетического полного резервного копирования
 Fig. 10 – Synthetic full backup algorithm

Для разработки программного модуля был выбран реверсивный инкрементальный алгоритм резервного копирования, как наиболее подходящий для разработанного алгоритма и более удобный в использовании.

Обсуждение результатов. При разработке программного средства был создан новый модифицированный алгоритм, использующий в своей основе три связанных друг с другом алгоритма, отвечающие за работу программы – сканирования, настройки правил сканирования, а также восстановления файлов. Алгоритм сканирования представлен в виде блок-схемы на рис. 11.

Суть данного алгоритма заключается в предоставлении четырёх разных режимов сканирования выбранной области и формировании хэш-таблицы просканированных файлов, чтобы в дальнейшем данные файлы можно было проверить на наличие несанкционированных изменений. Алгоритм имеет четыре режима сканирования файлов, что может использовать для более тонкой настройки сканирования файлов и создания таблиц хэш-кодов.

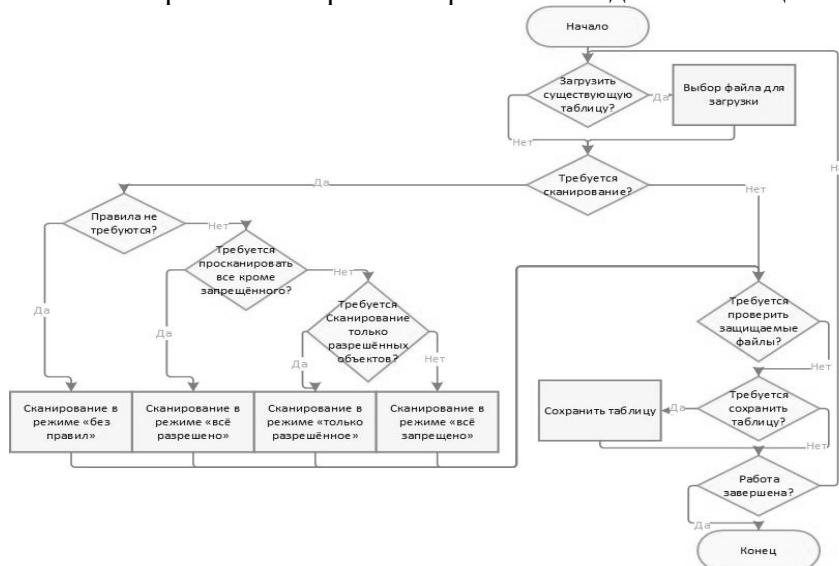


Рис. 11 – Блок-схема, описывающая алгоритм сканирования файлов
 Fig. 11 – Flowchart describing the file scanning algorithm

Программная реализация представлена в виде графического интерфейса на рис. 12. Первая вкладка, «Работа с хэш-таблицей», отвечает за сканирование файлов и директорий, а также работы с таблицей хэш-кодов и их проверке. При запуске любого режима, кроме режима «Только разрешенные», будет открыто окно выбора, необходимое для задания сканируемой директории. Запуск в режиме «Без правил» стоит по умолчанию, даже если

при запуске сканирования не отмечен ни один режим. В данном режиме сканируются все файлы в директории, а также все директории внутри неё и файлы, входящие в них.

В режиме «Всё разрешено» сканируется вся директория, её файлы и все директории в неё входящие, но в случае если в параметрах проверки присутствуют какие-либо запреты на сканирование файлов или директорий, то программа проигнорирует их.

При запуске в режиме «Всё запрещено» программа игнорирует все директории и файлы кроме тех, что помечены как разрешенные. В случае если в директории, не отмеченные как разрешённые, размещён файл или директория, помеченные как разрешённые, то в таком случае программа не просканирует их. При сканировании в режиме «Только разрешенные» программа перейдёт по сохранённым путям файлов, помеченных как разрешенных, и просканирует их.



Рис. 12 – Программная реализация алгоритма сканирования файлов
Fig. 12 – Software implementation of the file scanning algorithm

Алгоритм настройки правил сканирования файлов представлен в виде блок-схемы на рис. 13. Данный алгоритм позволяет провести настройку, для выбора файлов и директорий, что будут подлежать сканированию, а какие наоборот – не будут подвергаться процедуре сканирования.

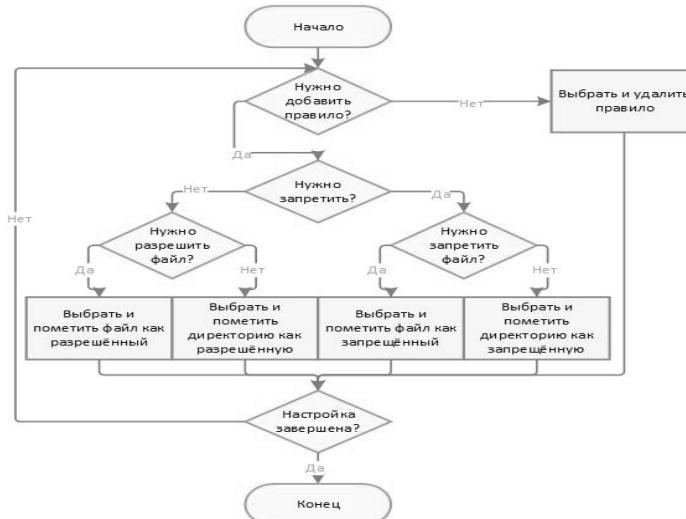


Рис. 13 – Блок-схема, описывающая алгоритм настройки сканирования файлов
Fig. 13 – Flowchart describing the file scanning setup algorithm

Программная реализация представлена в виде графического интерфейса на рис. 14.



Рис. 14 – Программная реализация алгоритма настройки сканирования файлов
Fig. 14 – Software implementation of the file scanning setup algorithm

Данная вкладка «Настройки параметров проверки» имеет пять функций, определяющих правила сканирования. Создание правила на разрешения доступа к файлу, а также его

запрет. Создание правила разрешающего и запрещающего доступа к директории. Также присутствует функция, позволяющая удалить добавленное правило.

Блок-схема алгоритма, отвечающего за восстановление файлов представлена на рис. 15. Данный алгоритм сохраняет резервные копии файлов в обозначенной директории, а также восстанавливает их в случае, если файл был несанкционированно изменён.

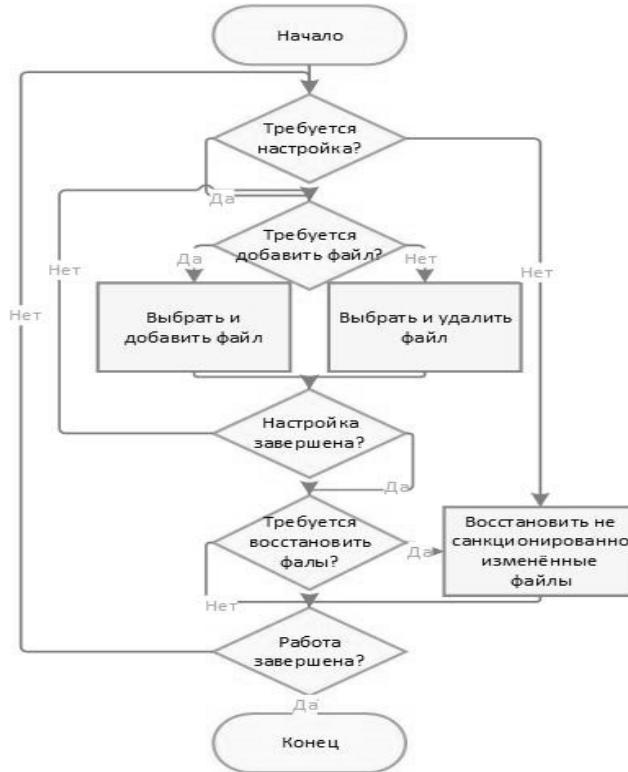


Рис. 15 – Блок-схема, описывающая алгоритм восстановления файлов
Fig. 15 – Flowchart describing the file recovery algorithm

Программная реализация представлена в виде графического интерфейса на рис. 16. Данная вкладка «Настройки резервного копирования» позволяет настраивать директорию для сохранения резервных копий файлов в формате «.amongus», добавить файл и создать его резервную копию, а также восстановить его или же удалить, используя соответствующие функции.



Рис. 16 – Программная реализация алгоритма восстановления файлов
Fig. 16 – Software implementation of the file recovery algorithm

Использование трёх алгоритмов сканирования, настройки правил и восстановления файлов позволяет создать крайне удобный инструмент для создания таблиц хэш-кодов, проверки несанкционированно изменённых файлов, которые можно восстановить из резервной копии. В настоящий момент существуют и другие программные решения резервного копирования и восстановления данных, которые рассматривались в качестве аналогов – пять программных решений, позволяющих провести резервное копирование, то есть восстановить повреждённые файлы.

Рассмотрим первый вариант – Easis Free Drive Cloning. Данная утилита содержит несколько функций, такие как, создание образа данных, восстановление данных из созданного образа и клонирование дисков. Графический интерфейс данного программного средства прост и удобен для обычных пользователей. Также этот инструмент создаёт резервную копию свободных секторов диска вместе с секторами, имеющими фактические данные. Однако, по сравнению с разработанным программным средством не обладает возможностью формирования таблиц хэш-кодов и настройкой сканирования файлов или директорий.

Следующим программным средством является Paragon Backup and Recovery – утилита, позволяющая восстанавливать файлы, директории и диски из образа и отдельных инкрементных точек сохранения. Может сжать и разделить данные, чтобы сэкономить место на диске. Несмотря на предоставляемые преимущества, данный инструмент не имеет возможности создания таблиц хэш-кодов и настройки сканирования.

Программное средство Action Backup обладает интуитивно понятный интерфейс и наделена широкими функциональными возможностями. Данный инструмент имеет возможность создавать (дублировать) резервные копии на множестве локальных и сетевых ресурсах, создавать образ диска, выполнять круглосуточное резервное копирование в режиме службы WINDOWS, отправлять отчеты о выполненных работах на E-Mail. Несмотря на предоставляемые преимущества, всё также отсутствует формирование хэш-таблиц и настройка параметров сканирования.

Утилита Comodo Backup спроектирована и разработана как наиболее подходящий вариант для обычных пользователей. Этот инструмент позволяет копировать документы, мультимедийные файлы, записи реестра, электронные письма, историю чата, все другие журналы и файлы. Также имеется возможность создать резервную копию данных в локальном или облачном хранилище. Формирование хэш-таблиц и настройка сканирования отсутствует.

EASEUS Todo Backup – является программным средством, созданным для решения задач резервного копирования, а также имеющее множество функций. Он предлагает три способа резервного копирования файлов – полный, дифференциальный и дополнительный. Кроме того, утилита предлагает создание образов с возможностью создания загрузочного диска на основе Linux. Имеется возможность создавать собственные резервные копии в любое время и даже планировать процесс резервного копирования. Однако, данная утилита не поддерживает отдельное сохранение файлов, так как работает с полными образами, а также не имеет возможности формирования таблиц хэш-кодов и настройки сканирования. Проведённый анализ разработанного программного средства с существующими аналогами был сформирован в табл.1.

Таблица 1. Сравнительный анализ программной реализации с аналогами
Table 1. Comparative analysis of software implementation with analogues

Название Title	Формирование хеш-таблиц Generating Hash tables	Настройка сканирования Scan settings	Сохранение файлов Saving files	Сохранение образа диска Saving a disk image
Easis Free Drive Cloning	-	-	-	+
Paragon Backup and Recovery	-	-	+	+
Action Backup	-	-	+	+
Comodo Backup	-	-	+	+
EASEUS Todo Backup	-	-	-	+
Bad Core Guard (разработанное средство)	+	+	+	+

В результате проведённых сравнений, были выявлены недостатки разработанного программного средства и составлен план его дальнейших модификаций для наиболее

удобной и практичной работы. После проведения сравнения функционала, было проведено тестирование разработанного программного средства, представленное на рис. 17 и 18, представляющих графики, показывающих эффективность работы программы относительно размера файла и времени, затраченного на работу алгоритмов.

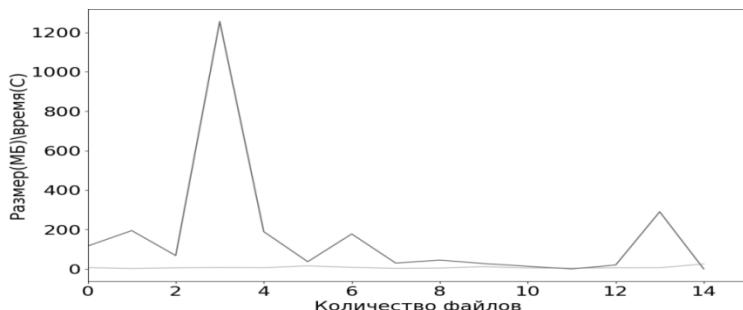


Рис. 17 – График тестирования алгоритма создания резервной копии
Fig.17 – Backup creation algorithm testing schedule

На графике, представленном на рис.17 показана зависимость затраченного времени, относительно размеров самого файла для создания резервной копии. Четырнадцать файлов с различными размерами от не превышающих единицу и свыше тысячи мегабайт, показывают незначительные расхождения в скорости формирования резервных копий, не превышающих половину минуты. В результате полученных данных можно отметить, что время формирования резервной копии файла практически не зависит от его размера.

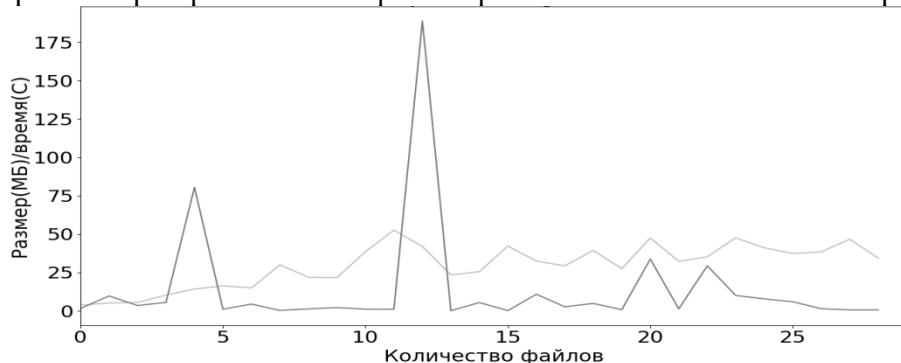


Рис. 18 – График тестирования алгоритма формирования таблицы хэш-кодов
Fig. 18 – Graph of testing the algorithm for generating a table of hash codes

На графике, представленном на рис. 18 также показана зависимость затраченного времени, относительно размеров самого файла для формирования таблицы хэш-кодов. Двадцать девять файлов с различными размерами от не превышающих единицу и свыше ста пятидесяти мегабайт, показывают незначительные расхождения в скорости формирования таблицы хэш-кодов, не превышающих минуту. Стоит отметить, что значительную часть времени занимает сам алгоритм формирования хэш-кода, который также нуждается в оптимизации для более быстрой работы.

В результате полученных данных можно отметить, что время формирования резервной копии файла в незначительно зависит от его размера. По результатам тестирования скорость работы алгоритма резервного копирования не зависит от размера файла, а скорость формирования хэш-таблицы зависит от объёма сканируемой информации незначительно.

Для разработки программного средства был выбран язык Python, так как данный язык зарекомендовал себя одним из самых популярных и широко используемых в разработке пользовательских приложений. Вместе с этим, также была выбрана среда программирования – Visual Studio Code от компании Microsoft [9].

Для разработки графической оболочки, использовалось программное средство QtDesigner – кроссплатформенная свободная среда для разработки графических интерфейсов [10,11]. Python – это интерпретируемый программный язык высокого уровня,

часто используемый множеством разработчиков для создания пользовательских приложений и обладает автоматическим управлением памяти, позволяющим повысить переносимость написанных на данном языке программных средств [12, 13]. Для создания программного средства использовалась версия Python 3.11.

Вывод. В результате проведенного исследования все поставленные цели были достигнуты, а именно:

- проведено исследование и выбор существующих алгоритмов хэширования;
- произведен анализ существующих алгоритмов сжатия и восстановления данных; разработана реализация программного средства;
- проведен сравнительный анализ реализованного средства с аналогами и модификациями.

В результате проведённых тестов, программное средство обнаружило изменённые и повреждённые файлы. Тестирование прошло успешно, тем самым показывая эффективность данного программного средства для восстановления и защиты файлов от повреждений. Результаты исследования доказывают, что каждый пользователь может защитить свои личные файлы от угроз при использовании данного программного средства.

Предложенный механизм восстановления данных является современным решением, обеспечивающим сохранность личных файлов в случае их повреждения.

Для будущего улучшения программного средства были выделены основные задачи, что будут рассмотрены при его обновлении: расширение функционала программного средства; оптимизация программного кода для достижения большего быстродействия; обновление и улучшение модулей программного средства; добавление функций копирования образа диска.

Библиографический список:

1. Телегин В.А. Анализ криптографической стойкости модифицированного алгоритма md5. Universum: технические науки, № 9–2 (114), 2023, с. 16–20.
2. Клименко С.В., Яковлев В.В., Благовещенская Е.А. Исследование реализаций алгоритмов контрольной суммы CRC32" Известия Петербургского университета путей сообщения, т. 15, № 3, 2018, с. 471–477.
3. Астахов С.В., Вариханов Д.И. Вычислитель хеш-функции SHA-256. Политехнический молодежный журнал, 2023, № 08 (85). URL: <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2023-8-924> (дата обращения 3.10.2023).
4. Эрдман А.А. Реализация алгоритма сжатия данных Лемпеля–Зива LZ77 на языке программирования Python. Постулат. – 2023. – №. 1.
5. Андриенко И.С. Разработка алгоритма сжатия данных RLE на языке программирования Python. Постулат. – 2023. – №. 1.
6. Звайгзне А.Ю. Создание алгоритма сжатия текстовых данных на языке программирования Python. Постулат. – 2023. – №. 1.
7. Чумбуридзе Я.А. Основные методы резервного копирования для обеспечения безопасности информации. Международный журнал гуманитарных и естественных наук, № 3-2 (78), 2023, с. 57–60.
8. Бопп В.А. Особенности выбора систем резервного копирования. Известия Тульского государственного университета. Технические науки, № 10, 2019, с. 297–300.
9. Официальный сайт программной среды Visual Code. URL: <https://code.visualstudio.com/docs>, дата обращения 12.11.2023.
10. Официальный сайт кроссплатформенной среды для разработки графической оболочки QtDesigner. URL: <https://doc.qt.io/qt-6/qtdesigner-manual.html>, дата обращения 16.11.2023.
11. Официальный сайт программного языка Python. URL: <https://www.python.org/doc/>, дата обращения 19.11.2023.
12. Импортозамещающие технологии обеспечения информационной безопасности и защиты данных : учебное пособие /Д.А. Короченцев, Л.В. Черкесова, Е.А. Ревякина [и др.]. — Ростов-на-Дону : Донской ГТУ, 2021. — 335 с.
13. Development of a real-time document approval system Cherkesova L., Boldyrikhin N., Revyakina E., Safaryan O., Yengibaryan I. В сборнике: E3S Web of Conferences. 14th International Scientific and Practical Conference on State and Prospects for the Development of Agribusiness, INTERAGROMASH 2021. Rostov-on-Don, 2021. С. 08047.

References:

1. Telegin V.A. Analysis of cryptographic resistance of the modified md5 algorithm. *Universum: technical sciences*, 2023; 9-2 (114):16-20. (In Russ).
2. Klimenko S.V., Yakovlev V.V., Blagoveshchenskaya E.A. Study of implementations of CRC32 checksum algorithms. *Bulletin of the Petersburg State University of Railway Engineering*, 2018; 15(3): 471-477. (In Russ).
3. Astakhov S.V., Varihanov D.I. SHA-256 hash function calculator. *Polytechnic Youth Journal*, 2023; 08 (85). URL: <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2023-8-924> (date of access 3.10.2023). (In Russ).
4. Erdman A.A. "Implementation of the Lempel-Ziv LZ77 data compression algorithm in the Python programming language." *Postulate*. 2023;1. (In Russ).
5. Andrienko I.S. "Development of the RLE data compression algorithm in the Python programming language." *Postulate*. 2023;1. (In Russ).
6. Zvaigzne A.Yu. "Creation of a text data compression algorithm in the Python programming language." *Postulate*. 2023;1. (In Russ).
7. Chumburidze Ya.A. "Basic backup methods to ensure information security" *International Journal of Humanities and Natural Sciences*, 2023; 3-2 (78):57–60. (In Russ).
8. Bopp V. A. "Features of choosing backup systems" *Bulletin of Tula State University. Technical sciences*, 2019; 10:297–300. (In Russ).
9. Official website of the Visual Code software environment. URL: <https://code.visualstudio.com/docs>, accessed 11/12/2023.
10. Official website of the cross-platform environment for developing the QtDesigner graphical shell. URL: <https://doc.qt.io/qt-6/qtdesigner-manual.html>, accessed 11/16/2023.
11. Official website of the Python programming language. URL: <https://www.python.org/doc/>, accessed 19.11.2023.
12. Import-substituting technologies for ensuring information security and data protection: a tutorial / D.A. Korochentsev, L.V. Cherkesova, E.A. Revyakina [et al.]. Rostov-on-Don: Donskoy GTU, 2021;335 (In Russ).
13. Development of a real-time document approval system Cherkesova L., Boldyrikhin N., Revyakina E., Safaryan O., Yengibaryan I. In the collection: E3S Web of Conferences. 14th Inter-national Scientific and Practical Conference on State and Prospects for the Development of Agribusiness, INTERAGROMASH 2021. Rostov-on-Don, 2021: 08047.

Сведения об авторах:

Черкесова Лариса Владимировна, доктор физико-математических наук, профессор, профессор, кафедра «Кибербезопасность информационных систем»; chia2002@inbox.ru

Савельев Василий Александрович, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент, кафедра «Кибербезопасность информационных систем»; vasav.rnd@mail.ru

Ревякина Елена Александровна, кандидат технических наук, доцент, доцент, кафедра «Кибербезопасность информационных систем»; Revyelena@yandex.ru

Полулях Анатолий Русланович, студент, кафедра «Кибербезопасность информационных систем»; tolik241510@gmail.com

Семенцов Максим Александрович, студент, кафедра «Кибербезопасность информационных систем»; maxim00990@yandex.ru.

Information about authors:

Larisa V. Cherkesova, Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Prof., Prof., Department «Cybersecurity of information Systems»; chia2002@inbox.ru

Vasily A. Savel'ev, Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Assoc. Prof., Assoc. Prof., Department «Cybersecurity of information Systems»; vasav.rnd@mail.ru

Elena A. Revyakina, Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Assoc. Prof., Assoc. Prof., Department «Cybersecurity of information systems»; Revye-lena@yandex.ru

Anatoly R. Polulyakh, Student, Department «Cybersecurity of information Systems»; tolik241510@gmail.com

Maxim A. Semencov, Student, Department «Cybersecurity of information systems»; maxim00990@yandex.ru.

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/ Received 15.08.2024.

Одобрена после рецензирования/ Revised 30.09.2024.

Принята в печать/ Accepted for publication 29.12.2024.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 004.056.5



DOI: 10.21822/2073-6185-2025-52-1-147-161 Оригинальная статья /Original article

Архитектура интегрированного java-приложения для анализа журналов с целью обнаружения компьютерных атак в информационных системах посредством реагирования на различные аномалии безопасности

П.И. Шариков, А.В. Красов, А.В. Майоров

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций

им. проф. М.А. Бонч-Бруевича,

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

Резюме. Цель. Необходимо при интеграции стека ELK в информационную систему иметь дублирующее java-приложение в закрытом контуре для скрытой обработки аномалий. Требуется разработка архитектуры java-приложения для скрытой интеграции с информационной системой. **Метод.** В процессе исследования были использованы методы анализа информации в журналах информационных систем, методы статического анализа, программирование для разработки приложения и алгоритмы обработки данных. **Результат.** Представлен пример реализации стека Elasticsearch для обработки и хранения журналов. Предложена реализация анализа аномалий с помощью официальной библиотеки Elasticsearch. Рассмотрены варианты использования Elasticsearch для анализа аномалий, предложена реализация анализа аномалий с помощью официальной библиотеки Elasticsearch. Предложена архитектура интегрированного в информационную систему java-приложения для автоматизированного анализа журналов с целью выявления компьютерных атак или сигналов их начала посредством поиска аномалий. Рассмотрены варианты аномалий в журналах информационных систем и описаны действия по их выявлению. Продемонстрирована обобщенная карта процесса работы java-приложения. **Вывод.** Разработана архитектура java-приложения, реализующего анализ журналов информационной системы по ключевым аномалиям.

Ключевые слова: ELK stack, elasticsearch, детектор аномалий, журналирование, anomaly logs detecting, java, анализ журналов, log analysis

Для цитирования: П.И. Шариков, А.В. Красов, А.В. Майоров. Архитектура интегрированного java-приложения для анализа журналов с целью обнаружения компьютерных атак в информационных системах посредством реагирования на различные аномалии безопасности. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025; 52(1):147-161. DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-1-147-161

Architecture of an integrated java application for log analysis to detect computer attacks in information systems by responding to various security anomalies

P.I. Sharikov, A.V. Krasov, A.V. Mayorov

M.A. Bonch-Bruevich St. Petersburg State University of Telecommunications,
22 Bolshevik Ave., St. Petersburg 193232, Russia

Abstract. Objective. When integrating the ELK stack into an information system, it is necessary to have a duplicate Java application in a closed circuit for hidden anomaly processing. It is necessary to develop the architecture of a Java application for hidden integration with the information system. **Method.** The research used methods of analyzing information in information system logs, static analysis methods, programming for application development, and data processing algorithms. **Result.** An example of implementing the Elasticsearch stack for processing and storing logs is presented. An implementation of anomaly analysis using the official

Elasticsearch library is proposed. Options for using Elasticsearch for anomaly analysis are considered, an implementation of anomaly analysis using the official Elasticsearch library is proposed. The architecture of a Java application integrated into an information system for automated log analysis in order to detect computer attacks or signals of their onset by searching for anomalies is proposed. Variants of anomalies in information system logs are considered and actions for their detection are described. A generalized map of the Java application workflow is demonstrated. **Conclusion.** The architecture of a Java application implementing the analysis of logs of an information system for key anomalies has been developed.

Keywords: ELK stack, elasticsearch, anomaly logs detecting, java, log analysis

For citation: P.I. Sharikov, A.V. Krasov, A.V. Mayorov. Architecture of an integrated java application for log analysis to detect computer attacks in information systems by responding to various security anomalies. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2025; 52(1):147-161. (In Russ) DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-1-147-161.

Введение. Обнаружение аномалий можно считать ценным инструментом передовой технологической информационной системы, целью которого является оперативное обнаружение любых аномалий в поведении в или с информационной системой и, таким образом, играющего центральную роль в управлении неисправностями или действиями злоумышленников. Быстрое обнаружение аномалии позволяет специалистам решить проблему или отреагировать на нелегитимные действия в системе, как можно скорее, таким образом, чтобы сократить время, в течение которого определенная служба не может использоваться или данные могут быть скомпрометированы.

Проблемный трафик может возникать по разным причинам, включая внешние атаки, передачу устаревших данных или даже обслуживание людей для сетевых предприятий. Это становится значительно более сложной задачей, когда масштаб сети становится более масштабным. Либо системы обнаружения аномалий, которые в настоящее время используются, были обучены на устаревших наборах данных, либо у них нет возможности эффективно обрабатывать большие нагрузки. Поэтому существует потребность в масштабируемом решении, которое может обеспечить безопасность сети, обнаруживая аномалии в самой сети и уведомляя быстрым ответом всякий раз, когда происходит аномалия, получая знания из предыдущего поведения сети.

Информационные системы в настоящее время генерируют большое количество журналов, в которые они вносят информацию, считающуюся важной во время их работы: такие файлы журналов, могут использоваться в качестве источника данных для обнаружения аномалий в масштабах всей информационной системы. Именно по этой причине обнаружение аномалий с помощью журналов информационной системы крайне распространено как в академической, так и в деловой сфере. Файлы журналов отдельных программ часто анализируются построчно, чтобы выявить аномалии благодаря использованию ключевых терминов или регулярных выражений. Однако к текущему моменту времени информационные системы усложняются галопирующими темпами.

Это означает, что такая простая и понятная процедура, как анализ журналов программы построчно более невозможно ввиду постоянно возрастающей сложности архитектуры информационных систем. Высокая сложность архитектуры информационной системы приводит к большему количеству создаваемых журналов и разработке, и реализации различных механизмов устойчивости системы к сбоям. Ситуация осложняется в системах с большим количеством интеграций, где происходит интеграция не программных компонентов (микросервисов), а полноценных сложно структурированных информационных систем. Управление журналами информационной системы является неотъемлемой частью кибербезопасности. Успешный механизм киберзащиты должен иметь несколько уровней и элементов [1]. Он включает в себя людей, политики безопасности и технологии, и каждый отдельный компонент должен работать вместе, чтобы сделать защиту эффективной

[1]. Управление журналами имеет решающее значение для смягчения цифровых угроз. Журналы безопасности и аутентификации могут пролить свет на необычное поведение, трафик и шаблоны доступа [2]. В девятом ежегодном исследовании стоимости киберпреступности, опубликованном в 2019 году компанией Accenture, утверждается, что «люди по-прежнему являются самым слабым звеном безопасности» [3]. Хотя постоянные кампании по повышению осведомленности в киберпространстве остаются одним из самых мощных инструментов, нельзя предполагать, что все всегда будут делать разумный выбор в области кибербезопасности. Постоянный мониторинг журналов центральная служба аутентификации информационной системы может помочь избежать любых «слепых пятен» и усилить аппарат кибербезопасности [4].

Постановка задачи. Угрозы в сетевой инфраструктуре, такие как сбои оборудования или программного обеспечения, позволяют третьим лицам воспользоваться этими уязвимостями. Требуется постоянное осознание новых проблем, которые могут возникнуть, а затем определение действий, которые будут направлены на эти проблемы.

Необходимо уделять внимание возможности узнать с помощью имеющихся данных, имеет ли состояние системы аномалии или нет, путем обнаружения аномалий с помощью анализа журналов в режиме реального времени посредством специализированного программного обеспечения. Даже при использовании Elastic stack (Logstash, Elasticsearch, Kibana) для получения, хранения, отбора и анализа журналов информационной системы может быть недостаточным. Настройки компоновки, фильтрации и анализа логов с помощью стека ELK можно без труда посмотреть при наличии прав доступа к информационной системе, что может сделать любой сотрудник. Однако, как было указано выше, в этом заключается большая часть проблемы.

Необходим дополнительный легковесный сервис, который будет дополнительно в фоновом режиме и скрыто обрабатывать журналы информационной системы из Elasticsearch на предмет действий злоумышленника или любые другие аномалии. Данная работа сосредоточена вокруг архитектуры и фрагментов реализации такого программного обеспечения, а также интеграции его со стеком ELK. Каждая информационная система с доступом к сети Интернет имеет потенциал для нарушения безопасности в этом месте. В современном мире существует множество потенциальных опасностей, наиболее распространенными из которых являются вирусы, являющиеся вредоносными программы, микропрограммами и скриптами. В дополнение к тому, что системы безопасности всегда обновляются для борьбы с этими угрозами, сами угрозы всегда обновляются, чтобы избежать идентификации в сети. В [5] упоминается, что существуют некоторые домены сетей, такие как данные обороны, безопасности и больниц, которые не должны быть нарушены ни при каких обстоятельствах; однако, даже если это так, эти домены продолжают подвергаться риску. Отсутствие адекватных средств кибербезопасности, в дополнение к быстрому развитию технологических возможностей, подчеркивает необходимость улучшения линий защиты.

В работе «Система сбора, хранения и обработки информации и событий безопасности на основе средств elastic stack» авторы провели исчерпывающий анализ на тему использования средств анализа журналов сетевого оборудования и информационных сетей, что послужило разработкой, обобщенной архитектуры системы мониторинга на основе стека ELK [6]. Результат является общим и решает общую проблему сбора и анализа журналов информационной системы, что не совсем подходит для текущего исследования в силу того, что существует необходимость наличия скрытого программного обеспечения осуществляющего дополнительную пост-обработку данных журналов из Elasticsearch (возможно, как и у коллег, реализованного в виде микросервиса с закрытым доступом к исходному коду). Вопросы анализа журналов информационных систем в режиме реального времени исследовались зарубежными коллегами в статье «A framework for social media data analytics using Elasticsearch and Kibana» [7]. Традиционно процессы, связанные

с онлайн-анализом, продуктивны и эффективны только тогда, когда сбор данных является одноразовым процессом. Авторы демонстрируют решение проблем анализа в режиме реального времени с использованием настраиваемой поисковой системы Elasticsearch. В исследовании используется архитектура распределенной базы данных, предварительно настроенная индексация и стандартизация фреймворка Elasticsearch для крупномасштабного интеллектуального анализа текста. Таким образом, авторы показывают, что использование анализа журналов в режиме реального времени оправдан и стек ELK решает их задачу, хотя и не исследованы вопросы безопасности в данном решении.

Сравнение адаптивных подходов оптимизации на основе графов и одноклассовых опорных векторных машин (SVM) было проведено с целью выявления аномальных действий, происходящих в сети [8]. Однако из-за ограничений по пространству метод использовался только с двумя наборами данных и применялся только в двух различных контекстах; в результате производительность не могла быть обобщена. Даже принимая во внимание возросшую сложность подхода, есть возможности для совершенствования.

Самая сложная проблема, с которой приходится сталкиваться системам предотвращения и обнаружения утечек данных на основе контента (DLPD) для предприятий, — это масштабируемость. Это означает, что эти системы неспособны своевременно обрабатывать большие объемы сетевых журналов [9]. Было написано большое количество статей о системах аномалий, которые способны обнаруживать аномалии в обучающих и тестовых наборах данных, которые были получены и сохранены. Однако сетевой трафик хранится в виде временного ряда, и эти решения не имеют возможности выполнять временной проект или предоставлять оповещения в реальном времени при обнаружении аномалий. Они обучались и тестились с использованием устаревших и непредсказуемо точных данных, поэтому их производительность в реальных сценариях с фактическими данными была низкой. Кроме того, они не показали хороших результатов.

В исследовании «Система обнаружения аномалий в журналах мониторинга состояния объекта защиты» авторы разработали систему обнаружения аномалий посредством языка программирования Python [10]. В данной работе анализ журналов осуществлялся с помощью специализированной библиотеки rsgrok, которая позволяет выполнять grok-выражения внутри python-файлов. Полученные данные преобразовывались в формат данных JSON и далее конвертировались в формат Pandas DataFrame. Таким образом, данная система решает задачу поиска аномалий, является более легковесной по сравнению со всеми инструментами стека ELK, однако, не затрагивает такие вопросы как безопасное хранение grok-выражений, изменение кодировки или управляющих символов журналов, что впоследствии может привести к проблемам сериализации данных журналов в формат JSON [11], а также в недостаточной мере описана архитектурная составляющая такой системы.

Шелухин О.И. и Рябинин В.С. в исследовании «Обнаружение аномалий больших данных неструктурированных системных журналов» рассматривают аномалии, как «экземпляры в наборе данных, которые не соответствуют регулярному поведению системы» [12]. В данной работе основной упор идет на несоответствие актуальных записей в журналах информационной системе ожидаемым. В работе авторам успешно удалось достигнуть выявления аномалий типа KERNMC и типа APPSEV посредством представленных классификаторов. Подходы, выведенные авторами данной работы применимы к текущему исследованию, журналирование дефектов во время работы информационной системы, стека трассировки какой-либо функции, является регулярным и даже в определенной степени ожидаемым поведением системы [13].

Таким образом существует необходимость рассматривать цепочки действий внутри информационной системы, приводящие к дефектам, ошибкам, несанкционированному доступу и другим маркерам аномальных активностей в информационной системе или сетевом оборудовании. Ставится задача разработать архитектуру программного обеспечения,

позволяющего анализировать журналы ИС и оборудования для поиска аномалий и своевременного реагирования.

Методы исследования. Elasticsearch - это открытая распределённая поисковая и аналитическая система для различных типов данных, включая текстовые, числовые, геопространственные, структурированные и неструктурированные данные. Она построена на основе библиотеки Apache Lucene и обеспечивает мощные возможности для полнотекстового поиска, анализа и хранения данных в реальном времени. Elasticsearch часто используется в составе стека Elastic Stack (ранее известного как ELK Stack).

Elasticsearch: Хранение и индексирование данных. Память стека представлена Elasticsearch. Она состоит из группы узлов, по которым сетевые журналы разделяются и хранятся в отформатированном виде, с репликами, настроенными по мере необходимости. Здесь журналы проходят ежедневную индексацию, при этом для каждой даты создаются новые индексы. Индексы могут быть запрошены для получения этой информации, а затем она может быть агрегирована в более крупный набор данных для обнаружения аномалий на основе интересующего временного интервала

Logstash: Сбор, обработка и преобразование данных из различных источников перед их отправкой в Elasticsearch. Данные собираются Logstash, который в данном случае состоит из сетевых журналов, а также прослушивает заданный путь и затем отправляет собранные данные в конечный пункт назначения, который в данном случае является кластером Elasticsearch. Logstash дополнительно форматирует данные, которые до сих пор были только значениями, преобразуя их в пары ключ-значение. Из-за этого Logstash создает конвейер для транспортировки данных из начальной точки в конечный пункт назначения, а также применяет необходимое форматирование к данным по пути.

Kibana: Инструмент визуализации данных, позволяющий создавать сводные таблицы, графики и проводить интерактивный анализ данных. В качестве основного средства связи между пользователем и методом обнаружения аномалий Kibana выступает в качестве интерфейса. Данные, нормальное поведение и выбросы представлены графически. Она может создавать графические изображения, такие как тепловые карты в обозревателе аномалий или иллюстративные представления в едином средстве просмотра метрик. Доступные параметры позволяют создавать и настраивать панель мониторинга, которая может отображать все соответствующие данные в удобоваримом формате.

Варианты использования Elasticsearch:

- Анализ журналов: Сбор и анализ файлов журналов от различных приложений и систем.
- Поиск по сайту: Реализация поиска на веб-сайтах и в приложениях.
- Мониторинг приложений: Отслеживание производительности и состояния приложений в реальном времени.
- Аналитика безопасности: Выявление аномалий и потенциальных угроз в безопасности.
- Бизнес-аналитика: Анализ клиентского поведения, продаж и других бизнес-показателей.
- Мошеннические транзакции: Анализ транзакций в реальном времени для выявления подозрительной активности.
- Мониторинг доступа: Отслеживание попыток несанкционированного доступа к счетам клиентов.
- Контроль привилегированных пользователей: Мониторинг действий администраций и пользователей с повышенными правами.
- Обнаружение внутренних угроз: Выявление аномальной активности сотрудников, которая может указывать на инсайдерские угрозы.
- Защита от ботов и сканирования: Обнаружение автоматизированных попыток подбора паролей или сбора данных.

- Анализ аномальной активности: Выявление необычных паттернов поведения пользователей, которые могут свидетельствовать о взломе аккаунтов.
- Системы управления доступом и идентификацией (IAM): Анализ журналов аутентификации и авторизации для выявления попыток компрометации учетных записей [14].

Пример реализации стека Elasticsearch представлен на рис. 1.

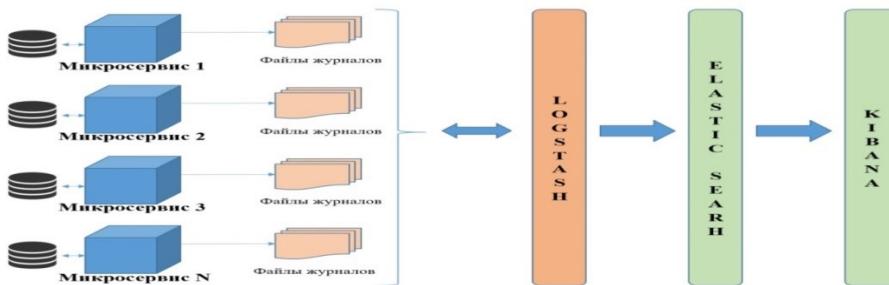


Рис. 1 - Пример реализации архитектуры Elasticsearch в информационной системе
Fig. 1 - Example of implementation of Elasticsearch architecture in an information system

Варианты использования Elasticsearch для анализа уязвимостей.

1. Сбор данных: Осуществляется сбор данных о безопасности из различных источников, таких как журналы событий, сетевые сканеры, отчеты о безопасности и другие инструменты. Эти данные могут включать информацию о попытках вторжений, уязвимостях, конфигурациях систем и т.д.
2. Индексирование данных: Собранные данные импортируются в Elasticsearch. Это осуществляется с помощью инструментов, таких как Logstash или Beats, которые помогают в обработке и передаче данных в Elasticsearch.
3. Поиск и анализ: Используются встроенные возможности поиска Elasticsearch для обнаружения аномалий, выявления уязвимостей и анализа трендов. Существует возможность создавать сложные запросы для фильтрации и агрегации данных.
4. Визуализация: Используется инструмент Kibana для визуализации данных, который интегрируется с Elasticsearch. Kibana позволяет создавать дашборды и визуализации, которые помогают лучше понять состояние безопасности вашей системы.
5. Автоматизация и оповещения: Осуществляется настройка автоматических оповещений на основе определенных условий, таких как обнаружение новых уязвимостей или аномальных действий. Это можно сделать с помощью инструмента Alerting в Elastic Stack.
6. Аналитика безопасности: используется для обнаружения и расследования угроз безопасности в режиме реального времени. Он может анализировать различные типы данных, такие как сетевой трафик, поведение пользователя и системные журналы, для выявления аномалий и угроз. Elasticsearch можно интегрировать с другими инструментами безопасности, такими как Suricata, Zeek и Snort, чтобы обеспечить комплексное решение безопасности.

Диаграмма рабочего процесса по анализу журналов и открытому выявлению аномалий представлена на рис. 2.



Рис. 2 - Диаграмма рабочего процесса анализа журналов на предмет аномалий с помощью Elasticsearch
Fig. 2 - Workflow diagram of analyzing logs for anomalies using Elasticsearch

Однако все вышеописанное не решает главную проблему. Все эти инструменты и их интеграции не являются скрытыми, как для пользователя, так и для разработчиков

системы. Необходим внешний модуль, который будет защищен политиками безопасности, код которого будет скрыт от всех, кроме небольшой группы разработчиков и который будет в закрытом режиме осуществлять анализ журналов из хранилища Elasticsearch. Данное приложение должно работать по типу черного ящика для сохранения в скрытом состоянии проверок, реализованных в его логике, а базовые общеизвестные проверки должны быть реализованы с помощью официального инструментария Elastic Stack.

Требования к приложению, осуществляющему скрытый анализ журналов. Как было описано ранее, необходимо, чтобы в контуре информационной системы имелся такой сервис, к которому никто не имеет доступ и логика анализа журналов максимально защищена. Сервис может быть представлен программным обеспечением, отдельным модулем или системой для обнаружения компьютерных атак в корпоративных и государственных информационных системах [15-17].

Таким образом, данный сервис должен по сути дублировать обнаружение аномалий в журналах информационной системы, ее компонентов или сетевого оборудования, но по логике кардинально отличаться. Также, необходимо, чтобы данное приложение имело доступ к хранилищу данных Elasticsearch, а, следовательно, возможность интеграции с ним. Действенным вариантом является использование официальной api-библиотеки Elasticsearch для языка программирования Java. Язык Java выбран в силу его популярности, кроссплатформенности и легкости интеграции со стеком Elastic в силу того, что весь стек реализован на языке программирования Java. При таких условиях к java-приложению должны предъявляться определенные требования безопасности для того, чтобы минимизировать различные риски компрометации [18].

Требования к java-приложению по скрытому анализу журналов:

- Необходимость использования шифрования данных на всех уровнях (например, по ГОСТ).
- Безопасное подключение к Elasticsearch с использованием HTTPS и аутентификации.
- Ограничение доступа к микросервису для сотрудников.
- Использование ролевой модели доступа и системы управления доступом и аутентификации, такие как OAuth или JWT.
- Микросервис должен быть скрыт от общего доступа и не должен быть виден в общих списках сервисов.
- Использование нестандартных портов и имен для сокрытия микросервиса.
- Размещение микросервиса в изолированной сети или сегменте, недоступном для общего доступа.
- Разработка микросервиса должна вестись небольшой группой сотрудников с высоким уровнем квалификации в области информационной безопасности и доступами к секретности.
- Хранение кода и конфигураций для него в защищенных репозиториях с ограниченным доступом.
- Использование системы управления секретами для хранения конфиденциальной информации.
- Использование обfuscации исходного кода и скрытого вложения цифрового водяного знака в байт-код class-файлов микросервиса для защиты его от компрометации, как образа Docker-контейнера или jar-файла [19-20]
- Постоянное регрессионное тестирование безопасности.

На рис. 3 приведен пример архитектурной схемы информационной системы с интеграцией java-приложения осуществляющего анализ журналов на предмет наличия аномалий.



Рис. 3 - Пример архитектуры ИС с использованием интеграции с специализированным java-приложением по анализу журналов на предмет наличия аномалий

Fig. 3 - An example of an IS architecture using integration with a specialized Java application for analyzing logs for anomalies

Архитектура java-приложения. Необходимо определить, какой функционал ожидается от приложения по анализу данных в Elasticsearch. Также, необходимо определить какие инструменты будут использоваться для реализации необходимой логики.

Данное приложение должно иметь возможность работать постоянно, не нуждаться в постоянных повторных запусках и периодически обрабатывать новые журналы, появляющиеся в Elasticsearch. Для примера, в данной работе будет приведена реализация java-приложения, разработанного с использованием Spring Boot, предназначенного для анализа журналов сетевой активности. С целью анализа журналов на наличие различных аномалий, таких как подозрительный трафик, использование небезопасных протоколов, доступ из не доверенных геолокаций и другие. Приложение использует конфигурацию из файла «application.properties» для настройки пороговых значений и списков доверенных элементов. Журналы анализируются с помощью регулярных выражений, а результаты выводятся в собственный журнал с использованием Log4j.

Таким образом, исходя из этих требований было решено реализовывать java-приложение на следующем стеке технологий:

- Java – язык программирования.
- Gradle – инструмент сборки.
- Spring Boot Starter - Основная зависимость для Spring Boot.
- Spring Boot Starter Data Elasticsearch - Зависимость для работы с Elasticsearch.
- Spring Boot Starter Test: Зависимость для тестирования с использованием Spring Boot
- Log4j - Зависимость для журналирования.
- Mockito - Зависимость для создания моков(эмуляций, заглушек) в тестах данного приложения.

Принято решение разделить приложение на 5 внутренних class-файлов:

- LogEntry.class - Класс для представления записи журнала. Он извлекает данные из сообщения журнала с помощью регулярных выражений и других функций.
- LogAnalyzerConfig.class - Класс для конфигурации java-приложения. Использует аннотации Spring для получения значений из «application.properties».
- LogAnalyzerApplication.class - Класс для запуска java-приложения. Он создает экземпляры необходимых компонентов и запускает анализ журналов, хранящихся в Elasticsearch.

- LogAnalyzerTest.class - Класс для юнит-тестов, использующий библиотеку Mockito для создания эмуляции (моков) конфигурации и тестирования логики анализа журналов, хранящихся в Elasticsearch.
- LogAnalyzer.class - Основной класс для анализа журналов. Он использует конфигурацию из LogAnalyzerConfig и анализирует каждый полученный журнал на наличие аномалий.

Обособленная схема взаимодействия частей java-приложения представлена на рис. 4.

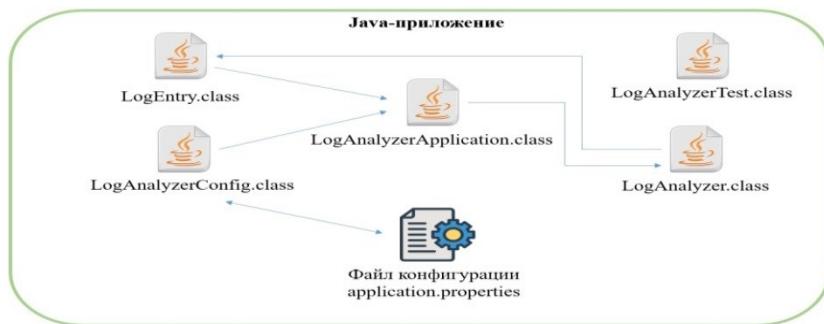


Рис. 4 - Модель схемы взаимодействия классов внутри java-приложения

Fig. 4 - Model of the interaction scheme of classes within a Java application

В описании алгоритма работы классов LogAnalyzerApplication LogAnalyzerConfig нет необходимости так как там выполняются базовые функции получения конфигурации java-приложения, настроек пользователя и параметров запуска. Остальные классы java-приложения необходимо осветить.

Возможности класса LogEntry заключаются в извлечении из данных Elasticsearch такой информации, как: количество пакетов; номер порта; протокол; IP-адрес; уровень активности пользователя; количество неудачных попыток входа; проверка наличия несанкционированных изменений; объем трафика; геолокация; временная метка файла журнала.

Класс LogAnalyzer является ключевым для java-приложения. Данный класс осуществляет проверки на наличие аномалий в полученных данных журналов из Elasticsearch. Выявление аномалий в сетевых журналах - это сложная задача, которая может включать в себя множество различных подходов и методик. Типы аномалий и методы их выявления, реализуемые классом LogAnalyzer описаны ниже.

Анализ журналов на наличие аномалий и варианты их выявления. В журналах информационных систем и сетевого оборудования могут отображаться различного рода артефакты поведения систем и пользователей в них, что выражается в аномалиях, которые необходимо отслеживать и анализировать.

Ниже представлен ряд отслеживаемых аномалий java-приложением. Также, необходимо учитывать, что информацию для удобства поиска аномалий нужно агрегировать по каким-либо параметрам, например, по пользователям, времени суток, типу события, геолокации, пакетам, портам.

Необычные объемы трафика.

Аномалия: Внезапное увеличение или уменьшение объема трафика в общем или по определенному порту.

Выявление: Необходимо использовать агрегации для вычисления среднего и стандартного отклонения объема трафика, после чего произвести сравнение текущих значений с историческими данными, чтобы выявить значительные отклонения.

В листинге 1 продемонстрирован пример фрагмента кода реализующий агрегации и проверки на наличие аномалий по объему трафика.

Листинг 1- Агрегация трафика и проверка на наличие аномалии

Listing 1- Traffic aggregation and checking for anomalies

```
// Агрегации по типу события
```

```
TermsAggregationBuilder eventTypeAgg = AggregationBuilders.terms("by_event_type").field("event_type");
searchSourceBuilder.aggregation(dateHistogramAgg);
searchSourceBuilder.aggregation(packetStatsAgg);
searchSourceBuilder.aggregation(portAgg);
searchSourceBuilder.aggregation(protocolAgg);
searchSourceBuilder.aggregation(ipAgg);
searchSourceBuilder.aggregation(userAgg);
searchSourceBuilder.aggregation(eventTypeAgg);
searchRequest.source(searchSourceBuilder);
SearchResponse searchResponse = client.search(searchRequest, RequestOptions.DEFAULT);
// Обработка результатов
Stats packetStats = searchResponse.getAggregations().get("packet_stats");
log.info("Среднее количество пакетов: " + packetStats.getAvg());
log.info("Максимальное количество пакетов: " + packetStats.getMax());
// Необычные объемы трафика
if (packetStats.getMax() > 1000) {
log.info("Аномалия: Обнаружено большое количество пакетов!");
```

Подозрительные порты.

Аномалия: Трафик на портах, которые обычно не используются в вашей сети.

Выявление: Необходимо создать список «разрешенных» портов и отслеживать трафик на портах, которые не входят в данный список доверенных портов.

Необычные IP-адреса.

Аномалия: Взаимодействие с IP-адресами, которые не являются частью обычной сетевой активности для информационной системы.

Выявление: Необходимо использовать агрегации для подсчета уникальных IP-адресов и произвести сравнения их с «белым» списком доверенных IP-адресов.

Подозрительные протоколы.

Аномалия: Использование небезопасных или необычных протоколов.

Выявление: Необходимо отслеживать использование протоколов, которые не являются стандартными для информационной системы, например, Telnet или FTP.

В листинге 2 представлен пример фрагмента кода, демонстрирующий агрегации по портам, ip-адресам, протоколам и реализацию проверок на наличие аномалий.

Листинг 2- Агрегация по портам, адресам, протоколам с проверкой на аномалии

Listing 2- Aggregation by ports, addresses, protocols with anomaly checking

```
Terms portTerms = searchResponse.getAggregations().get("by_port");
log.info("Агрегация по портам:");
for (Terms.Bucket bucket : portTerms.getBuckets()) {
log.info("Порт: " + bucket.getKeyAsString() + ", Количество: " + bucket.getDocCount());
}
Terms protocolTerms = searchResponse.getAggregations().get("by_protocol");
System.out.println("Агрегация по протоколам:");
for (Terms.Bucket bucket : protocolTerms.getBuckets()) {
log.info ("Протокол: " + bucket.getKeyAsString() + ", Количество: " + bucket.getDocCount());
}
Terms ipTerms = searchResponse.getAggregations().get("by_ip");
log.info ("Агрегация по IP-адресам:");
for (Terms.Bucket bucket : ipTerms.getBuckets()) {
log.info("IP: " + bucket.getKeyAsString() + ", Количество: " + bucket.getDocCount());
}
// Подозрительные порты
for (Terms.Bucket bucket : portTerms.getBuckets()) {
int port = Integer.parseInt(bucket.getKeyAsString());
if (SUSPICIOUS_PORTS.contains(port)) {
log.info("Аномалия: Обнаружен подозрительный трафик на порту " + port);
}
}
// Подозрительные протоколы
for (Terms.Bucket bucket : protocolTerms.getBuckets()) {
String protocol = bucket.getKeyAsString();
```

```
        if (SUSPICIOUS_PROTOCOLS.contains(protocol.toLowerCase())) {
            log.info ("Аномалия: Обнаружен подозрительный протокол " + protocol);
        }
    }
    // Необычные IP-адреса
    for (Terms.Bucket bucket : ipTerms.getBuckets()) {
        String ip = bucket.getKeyAsString();
        if (!TRUSTED_IPS.contains(ip)) {
            log.info ("Аномалия: Обнаружен трафик с неизвестного IP " + ip);}}
```

Частые неудачные попытки входа.

Аномалия: Многочисленные неудачные попытки аутентификации за короткий период времени.

Выявление: Необходимо использовать агрегации по времени для подсчета неудачных попыток входа и установить порог, приемлемый для тестируемой информационной системы, для определения аномалий такого рода.

Необычные геолокации.

Аномалия: Доступ к сети из геолокаций, которые не являются доверенными для информационной системы.

Выявление: Необходимо использовать геолокационные данные для IP-адресов и произвести сравнение их с местоположениями из доверенного списка.

Временные аномалии.

Аномалия: Сетевая активность в нерабочее время.

Выявление: Необходимо использовать временные агрегации для выявления активности в нерабочие часы или дни.

Сетевые сканирования.

Аномалия: Многочисленные попытки подключения к разным портам с одного IP-адреса.

Выявление: Производится отслеживание количества уникальных портов, к которым обращается один IP-адрес, и устанавливается порог количества для определения сканирования.

Необычные шаблоны использования.

Аномалия: Выявление необычных шаблонов использования ресурсов (например, чрезмерное использование определенного сервиса).

Выявление: Необходимо использовать агрегации по ресурсам и производить сравнение с историческими данными.

Необычные последовательности событий.

Аномалия: Анализ последовательности событий для выявления необычных действий, таких как последовательные неудачные попытки входа.

Выявление: Необходимо использовать последовательные агрегации и производить детальный анализ последовательности цепочек действий пользователей в информационной системе.

Необычная частота событий.

Аномалия: Выявление аномалий на основе частоты событий, таких как слишком частые запросы от одного IP-адреса.

Выявление: Необходимо использовать агрегации по времени и IP-адресам для анализа частоты событий.

Различные сетевые атаки.

Аномалия: Выявление атак, таких как DDoS, на основе анализа объемов трафика и распределения по IP-адресам.

Выявление: Необходимо использовать агрегации по IP и времени для выявления аномальных пиков трафика.

Листинг 3 демонстрирует агрегацию по IP-адресам и простейшую проверку на реализацию сетевой атаки.

Листинг 3 - Агрегация по ip-адресам и проверка на сетевую атаку
Listing 3 - Aggregation by IP addresses and checking for network attack

```
SearchRequest searchRequest = new SearchRequest("logs");
SearchSourceBuilder sourceBuilder = new SearchSourceBuilder();
sourceBuilder.query(QueryBuilders.matchAllQuery());
searchRequest.source(sourceBuilder);
SearchResponse searchResponse = client.search(searchRequest, RequestOptions.DEFAULT);
searchResponse.getHits().forEach(hit -> {
String logMessage = hit.getSourceAsString();
log.info("Анализ журнала: " + logMessage);

private boolean isPotentialDDoSAttack(String logMessage) {
// Пример проверки на DDoS атаку
Pattern pattern = Pattern.compile("Объем трафика: (\d+)");
Matcher matcher = pattern.matcher(logMessage);
if (matcher.find()) {
int trafficVolume = Integer.parseInt(matcher.group(1));
return trafficVolume > 10000; // Пороговое значение для DDoS
}
return false;
}
// Аномалия выявления атак, например, как DDoS
if (isPotentialDDoSAttack(logMessage)) {
log.info("Аномалия: Обнаружена потенциальная DDoS атака");
}
```

Несанкционированные изменения в конфигурации.

Описание: Обнаружение изменений в конфигурации, которые могут указывать на несанкционированные действия пользователей или злоумышленников.

Выявление: Необходимо производить анализ журналов на предмет изменений конфигурации и постоянное сравнение с имеющимися с историческими данными.

Обобщенный пример карты процесса работы java-приложения по анализу журналов событий информационной системы из Elasticsearch продемонстрирована на рис. 5.

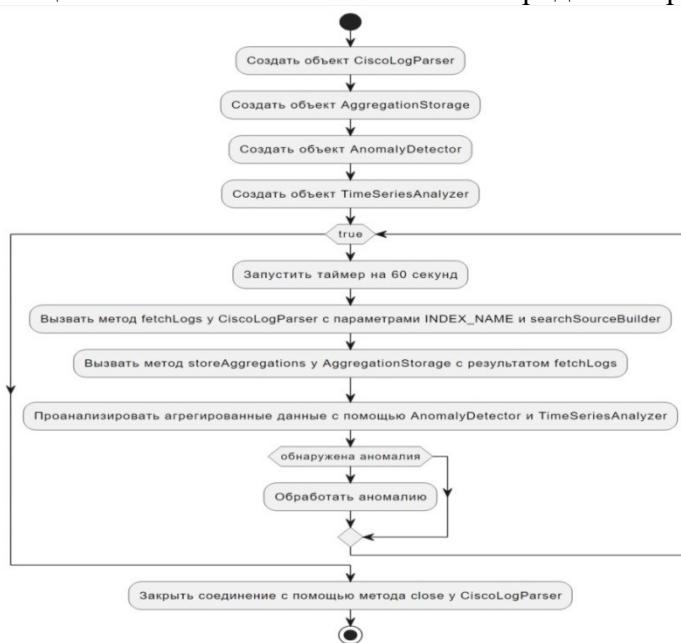


Рис. 5 - Обобщенная карта процесса работы java-приложения по анализу журналов событий информационной системы

Fig. 5- Generalized map of the process of work of the Java application for analysis of event logs of the information system

Обсуждение результатов. В данной работе исследована архитектура интеграции стека ELK в информационную систему. Определены ситуации, когда необходимо отслеживать подозрительную активность в журналах. Определены основные аномалии, кото-

рые необходимо ожидать в журналах информационной системы и оборудования, после чего реагировать.

Разработана архитектура ПО для анализа журналов в закрытом контуре и поиска аномалий. Использование разработанной архитектуры и предоставленных аномалий в журналах позволит в режиме реального времени реагировать на действия злоумышленников, сбои системы, различные атаки и внутренние действия по саботажу. В дальнейшем предстоит исследовать взаимосвязь аномалий друг с другом, а также вывести алгоритм определения цепочек вредоносных действий в рамках одной информационной системы и ее оборудования.

Вывод. Продемонстрированы возможности стека инструментов Elastic для анализа аномалий в журналах информационных систем. Представлены вариации внедрения Elastic stack в архитектуру информационной системы. Продемонстрирована возможность скрытой интеграции java-приложения для параллельного анализа журналов на предмет аномалий, что позволяет скрыть во внутреннем контуре информационной системы те проверки, по которым java-приложение сигнализирует о найденной аномалии. Представлено краткое описание возможностей для скрытой интеграции java-приложения в информационную систему, рассмотрен пример архитектуры подобной интеграции, даны рекомендации по внедрению и указаны требования к разрабатываемому приложению-анализатору.

Рассмотренные виды аномалий, на наличие которых возможно анализировать журналы информационной системы, покрывают большинство «начальных этапов» компьютерных атак, что позволяет своевременно реагировать на различные рода манипуляции с информационной системой, ее данными, ролевой моделью или системой безопасности. Для рассмотренных аномалий даны шаги их локализации в файлах журналов информационной системы, а также продемонстрированы фрагменты исходного кода, позволяющего производить проверки с помощью java-приложения в автоматизированном режиме.

Продемонстрирована обобщённая карта процесса работы интегрированного java-приложения, которая демонстрирует общий принцип работы данного приложения внутри информационной системы.

Библиографический список:

1. Zamani M., Movahedi M. Machine learning techniques for intrusion detection // arXiv preprint arXiv:1312.2177. – 2013.
2. Kononenko O. et al. Mining modern repositories with elasticsearch // Proceedings of the 11th working conference on mining software repositories. – 2014. – С. 328-331.
3. Salo F. et al. Data mining techniques in intrusion detection systems: A systematic literature review // IEEE Access. – 2018. – Т. 6. – С. 56046-56058.
4. Son S. J., Kwon Y. Performance of ELK stack and commercial system in security log analysis // 2017 IEEE 13th Malaysia international conference on communications (MICC). – IEEE, 2017. – С. 187-190.
5. Орлов, Г.А. Применение Big Data при анализе больших данных в компьютерных сетях / Г.А. Орлов, А.В. Красов, А.М. Гельфанд // Наукометрические технологии в космических исследованиях Земли. – 2020. – Т. 12, № 4. – С. 76-84. – DOI 10.36724/2409-5419-2020-12-4-76-84. – EDN RQQTOQ.
6. Котенко, И.В. Система сбора, хранения и обработки информации и событий безопасности на основе средств Elastic Stack / И.В. Котенко, А.А. Кулешов, И.А. Ушаков // Труды СПИИРАН. – 2017. – № 5(54). – С. 5-34. – DOI 10.15622/sp.54.1. – EDN ZMREVZ.
7. Shah N., Willick D., Mago V. A framework for social media data analytics using Elasticsearch and Kibana // Wireless networks. – 2022. – Т. 28. – №. 3. – С. 1179-1187.
8. Bhattacharjee S. D. et al. Context-aware graph-based analysis for detecting anomalous activities // 2017 IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME). – IEEE, 2017. – С. 1021-1026.
9. Cheng L., Liu F., Yao D. Enterprise data breach: causes, challenges, prevention, and future directions. Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery. 2017;7:5: e1211.
10. Башмаков, Н. М. Система обнаружения аномалий в журналах мониторинга состояния объекта защиты / Н. М. Башмаков, В. В. Уразаев, А. М. Вульфин // Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР. – 2023. – № 1-3. – С. 36-41. – EDN LUQUGC.

11. Шариков П.И., Красов А.В. Исследование уязвимости сериализации и десериализации данных в java//Региональная информатика и информационная безопасность:сборник научных трудов, Санкт-Петербург, 01–03 ноября 2017 г. Санкт-Петербургское Общество информатики, вычислительной техники, систем связи и управления. Выпуск 3. Санкт-Петербург:Санкт-Петербургское общество информатики, вычислительной техники, систем связи и управления, 2017. – С. 333-336. – EDN YNAETH.
12. Шелухин, О.И. Обнаружение аномалий больших данных неструктурированных системных журналов / О.И. Шелухин, В.С. Рябинин // Вопросы кибербезопасности. – 2019. – № 2(30). – С. 36-41. – DOI 10.21681/2311-3456-2019-2-36-41. – EDN IGKKGG.
13. Красов А.В., Сахаров Д.В., Тасюк А.А. Проектирование системы обнаружения вторжений для информационной сети с использованием больших данных//Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли. – 2020.– Т.12, № 1.– С.70-76. DOI 10.36724/2409-5419-2020-12-1-70-76. - EDN UJEKZY.
14. Миняев А.А., Красов А.В., Сахаров Д.В. Метод оценки эффективности системы защиты информации территориально-распределенных информационных систем персональных данных//Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1:Естественные и технические науки. – 2020. – № 1. – С. 29-33. – DOI 10.46418/2079-8199_2020_1_5. EDN ULHTJK.
15. Миняев, А.А. Методика оценки эффективности системы защиты информации территориально-распределенных информационных систем / А.А. Миняев, А.В. Красов // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1: Естественные и технические науки. – 2020. – № 3. – С. 26-32. – DOI 10.46418/2079-8199_2020_3_4. – EDN YNHOEI.
16. Технические аспекты управления с использованием сети Интернет : Монография / А.А. Алейников, К.З. Билятдинов, А.В. Красов [и др.]. – Санкт-Петербург : Центр научно-информационных технологий «Астерион», 2016. – 305 с. – ISBN 978-5-00045-408-4. – EDN XGTJLL.
17. Майоров, А.В. Архитектура и программная реализация системы обнаружения компьютерных атак в корпоративных и государственных информационных системах на основе методов интеллектуального анализа / А.В. Майоров // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1: Естественные и технические науки. – 2023. – № 2. – С. 40-46. – DOI 10.46418/2079-8199_2023_2_8. – EDN HEPDFF
18. Шариков П.И., Цветков А.Ю., Сигачева В.В., Сиротина Л.К. Исследование и алгоритм предотвращения эксплуатации уязвимостей библиотеки журналирования Log4j в информационных системах java-приложений // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1: Естественные и технические науки. – 2023. – № 4. – С. 100-106. – DOI 10.46418/2079-8199_2023_4_19. – EDN BULSOH
19. Шариков П.И. Методика обfuscации байт-кода java-приложения с целью его защиты от атак декомпиляцией // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1: Естественные и технические науки. – 2022. – № 1. – С. 64-72. – DOI 10.46418/2079-8199_2022_1_10. – EDN AUOFNA
20. Шариков, П.И. Методика создания и скрытого вложения цифрового водяного знака в байт-код class-файла на основе не декларированных возможностей виртуальной машины java // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. – 2023. – № 7-2. – С. 165-174. – DOI 10.37882/2223-2982.2023.7-2.37. – EDN YBEWYQ

References:

1. Zamani M., Movahedi M. Machine learning techniques for intrusion detection. arXiv preprint arXiv:1312.2177. – 2013.
2. Kononenko O. et al. Mining modern repositories with elasticsearch. *Proceedings of the 11th working conference on mining software repositories*. 2014:328-331.
3. Salo F. et al. Data mining techniques in intrusion detection systems: A systematic literature review. *IEEE Access*. 2018; 6: 56046-56058.
4. Son S. J., Kwon Y. Performance of ELK stack and commercial system in security log analysis. 2017 *IEEE 13th Malaysia international conference on communications (MICC)*. IEEE, 2017;187-190.
5. Orlov, G.A. Application of Big Data in the Analysis of Big Data in Computer Networks / G.A. Orlov, A.V. Krasov, A. M. Gelfand. *High-tech in space exploration of the Earth*. 2020;12(4):76-84. - DOI 10.36724/2409-5419-2020-12-4-76-84. - EDN RQQTOQ. (In Russ)
6. Kotenko I.V., Kuleshov A.A., Ushakov I.A. System for collecting, storing and processing information and security events based on Elastic Stack., *Proceedings of SPIIRAS*. 2017;5 (54):5-34. - DOI 10.15622/sp.54.1. - EDN ZMREVZ. (In Russ)
7. Shah N., Willick D., Mago V. A framework for social media data analytics using Elasticsearch and Kibana. *Wireless networks*. 2022; 28:3:1179-1187.
8. Bhattacharjee S. D. et al. Context-aware graph-based analysis for detecting anomalous activities. 2017 *IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME)*. IEEE, 2017:1021-1026.

9. Cheng L., Liu F., Yao D. Enterprise data breach: causes, challenges, prevention, and future directions. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery*. 2017;7:5:1211.
10. Bashmakov, N.M. System for detecting anomalies in logs of monitoring the state of a protected object / N.M. Bashmakov, V.V. Urazaev, A.M. Wulfin. *Collection of selected articles of the scientific session of TUSUR*. 2023;1-3:36-41. - EDN LUQUGC. (In Russ)
11. Sharikov, P.I., Krasov A.V. Study of the vulnerability of serialization and deserialization of data in Java // Regional informatics and information security: collection of scientific papers, St. Petersburg, November 01-03, 2017 / St. Petersburg Society for Informatics, Computer Engineering, Communications and Control Systems. Volume Issue 3. - St. Petersburg: St. Petersburg Society for Informatics, Computer Engineering, Communications and Control Systems, 2017: 333-336. - EDN YNAETH. (In Russ)
12. Sheloukhin O.I., Ryabinin V.S. Detection of anomalies in big data of unstructured system logs . *Cybersecurity Issues*. 2019; 2 (30):36-41. - DOI 10.21681/2311-3456-2019-2-36-41. - EDN IGKKGG. (In Russ)
13. Krasov, A.V. Design of an Intrusion Detection System for an Information Network Using Big Data / A.V. Krasov, D.V. Sakharov, A.A. Tasyuk. *High Technologies in Space Research of the Earth*. 2020;12(1):. 70-76. - DOI 10.36724/2409-5419-2020-12-1-70-76. - EDN UJEKZY. (In Russ)
14. Minyaev A.A., Krasov A.V., Sakharov D.V. Method for Assessing the Effectiveness of an Information Security System for Geographically Distributed Personal Data Information Systems. *Bulletin of the St. Petersburg State University of Technology and Design. Series 1: Natural and Technical Sciences*. 2020;1:29-33. - DOI 10.46418/2079-8199_2020_1_5. - EDN ULHTJK. (In Russ)
15. Minyaev, A.A. Methodology for assessing the effectiveness of the information security system of geographically distributed information systems / A.A. Minyaev, A.V. Krasov. *Bulletin of the St. Petersburg State University of Technology and Design. Series 1: Natural and technical sciences*. 2020; 3: 26-32. - DOI 10.46418/2079-8199_2020_3_4. - EDN YNHOEI. (In Russ)
16. Technical aspects of management using the Internet: Monograph / A.A. Aleinikov, K.Z. Bilyatdinov, A.V. Krasov [et al.]. - Saint Petersburg: Center for Scientific and Information Technologies "Asterion", 2016: 305 ISBN 978-5-00045-408-4. - EDN XGTJLL. (In Russ)
17. Mayorov, A.V. Architecture and software implementation of a system for detecting computer attacks in corporate and government information systems based on intelligent analysis methods / A.V. Mayorov. *Bulletin of the St. Petersburg State University of Technology and Design. Series 1: Natural and technical sciences*. 2023; 2: 40-46. - DOI 10.46418/2079-8199_2023_2_8. - EDN HEPDFF. (In Russ)
18. Sharikov P.I., Tsvetkov A.Yu., Sigacheva V.V., Sirotina L.K. Research and algorithm for preventing exploitation of vulnerabilities of the Log4j logging library in Java application information systems. *Bulletin of the St. Petersburg State University of Technology and Design. Series 1: Natural and Technical Sciences*. 2023; 4:100-106. - DOI 10.46418/2079-8199_2023_4_19. - EDN BULSOH. (In Russ)
19. Sharikov P.I. Methodology for obfuscation of Java application bytecode in order to protect it from decompilation attacks. *Bulletin of the St. Petersburg State University of Technology and Design. Series 1: Natural and Technical Sciences*. 2022;1:64-72. DOI 10.46418/2079-8199_2022_1_10. - EDN AUOFNA. (In Russ)
20. Sharikov P.I. Methodology for creating and hidden embedding a digital watermark in the bytecode of a class file based on undeclared capabilities of the Java virtual machine. *Modern science: current problems of theory and practice. Series: Natural and technical sciences*. 2023;7-2:165-174. - DOI 10.37882/2223-2982.2023.7-2.37. - EDN YBEWYQ. (In Russ)

Сведения об авторах:

Шариков Павел Иванович, кандидат технических наук, старший преподаватель, кафедра защищенных систем связи; sharikov.pavel@ro.ru; ORCID: 0000-0003-3996-9217

Красов Андрей Владимирович, кандидат технических наук, доцент, кафедра защищенных систем связи; krasov@inbox.ru; ORCID: 0000-0002-9076-6055

Майоров Александр Владимирович, аспирант, кафедра защищенных систем связи; avmayorov@bk.ru

Information about authors:

Pavel I. Sharikov, Cand. Sci. (Eng), Senior Lecturer, Department of Secure Communication Systems; sharikov.pavel@ro.ru; ORCID: 0000-0003-3996-9217

Andrey V. Krasov, Cand. Sci. (Eng), Assoc. Prof., Department of Secure Communication Systems; krasov@inbox.ru; ORCID: 0000-0002-9076-6055

Alexander V. Mayorov, Graduate Student, Department of Secure Communication Systems; avmayorov@bk.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 17.11.2024

Одобрена после/рецензирования Revised 20.12.2024.

Принята в печать/Accepted for publication 12.01.2025.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 004.8

DOI: 10.21822/2073-6185-2025-52-1-162-172 Оригинальная статья /Original article



Модификация автоматического метода извлечения причинно-следственных связей, основанного на шаблонах и Байесовском классификаторе

Х.Б. Штанчай^{1,2}, З.Т. Мугутдинов¹

¹Дагестанский государственный технический университет,

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

²ООО «Салаватстекло Каспий»,

²368080, Республика Дагестан, с. Коркмаскала, Заводская ул, зд.1 стр.1, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является модификация автоматического метода извлечения причинно-следственных связей. **Метод.** Исследование основано на оригинальном методе Антонио Соргенте с его последующей модификацией. **Результат.** Предложен метод извлечения причинно-следственных связей. Метод предполагает комбинированное использование статистических данных и машинных методов. Оригинальный метод был модифицирован переводом работы метода на современные библиотеки, такие как NLTK и Spacy. Правила, сформированные автором, были переработаны и добавлены в модуль Dependency Matcher библиотеки Spacy. Количество ключевых слов по каждому правилу были увеличены. Метод так же предполагает учет синонимов, подсчет Байесовской статистики и сглаживание Лапласа для нулевых вероятностей. Исходя из разности данных с ПСС и без, был введен коэффициент multiplier для компенсации перекоса классов в данных. **Вывод.** Разработанный метод был протестирован на исходных данных оригинального метода и показал улучшенные метрики относительно оригинального метода на тренировочных и тестовых данных.

Ключевые слова: причинно-следственные связи, обработка естественного языка, NLTK, Spacy, причинность, причина, следствие, статические методы, нестатические методы, машинные методы

Для цитирования: Х.Б. Штанчай, З.Т. Мугутдинов. Модификация автоматического метода извлечения причинно-следственных связей, основанного на шаблонах и Байесовском классификаторе. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025; 52(1):162-172. DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-1-162-172

Modification of an automatic method for extracting causal relationships based on templates and a Bayesian classifier

H.B. Shtanchaev^{1,2}, Z.T. Mugutdinov¹

¹Daghestan State Technical University,

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

²ООО "Salavatsteklo Caspian",

²Zavodskaya St., Republic of Daghestan, s. Korkmaskala 368080, Russia

Abstract. Objective. The aim of the study is to modify the automatic method for extracting cause-and-effect relationships. **Method.** The study is based on the original method of Antonie Sorgente with its subsequent modification. **Result.** A method for extracting cause-and-effect relationships is proposed. The method involves the combined use of statistical data and machine methods. The original method was modified by translating the method to modern libraries such as NLTK and Spacy. The rules formed by the author were reworked and added to the Dependency Matcher module of the Spacy library. The number of keywords for each rule was increased. The method also takes into account synonyms, calculates Bayesian statistics and

smooths Laplace for zero probabilities. Based on the difference in data with and without PSS, a multiplier coefficient was introduced to compensate for the skew of classes in the data. **Conclusion.** The developed method was tested on the original data of the original method and showed improved metrics relative to the original method on training and test data.

Keywords: cause and effect, natural language processing, NLTK, Spacy, causality, cause, effect, static methods, non-static methods, machine methods

For citation: H.B. Shtanchaev, Z.T. Mugutdinov. Modification of an automatic method for extracting causal relationships based on templates and a Bayesian classifier. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2025; 52(1):162-172. (In Russ) DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-1-162-172.

Введение. Понимание причинно-следственных связей является фундаментальным для человеческого разума. Человек постоянно стремится разобраться, почему происходят события, чтобы предвидеть будущее и принимать обоснованные решения. В современном мире, где информация доступна в огромных объемах, а технологии развиваются стремительно, способность извлекать причинно-следственные связи из данных становится все более важной и имеет решающее значение для прогресса во множестве отраслей, от медицины и финансов до маркетинга и образования.

Постановка задачи. Важность и актуальность задачи извлечения причинно-следственных связей из данных обоснована несколькими причинами:

- Улучшение поиска информации и ответов на вопросы. Современные поисковые системы и системы вопросов-ответов могут использовать извлеченные причинно-следственные связи для предоставления более релевантных и точных ответов на запросы пользователей.

- Анализ больших данных и выявление скрытых шаблонов. В бизнесе, науке и других областях анализ больших объемов текстовых данных с целью выявления причинно-следственных связей помогает выявить скрытые паттерны и тенденции. Это может быть полезно для предсказания будущих событий, понимания основных факторов, влияющих на результаты, и принятия обоснованных решений.

- Поддержка принятия решений. В различных отраслях, таких как медицина, финансы, производство и управление, понимание причинно-следственных связей помогает руководителям и специалистам принимать более информированные решения. Например, врачи могут использовать результаты анализа медицинских текстов для выявления причин заболеваний и выбора оптимальных методов лечения.

- Создание новых знаний и научные исследования. В научных исследованиях автоматическое извлечение причинно-следственных связей способствует обогащению знаний, позволяя исследователям быстрее находить релевантную информацию и строить новые гипотезы. Это особенно актуально в областях, где количество научных публикаций растет экспоненциально.

- Анализ социальных явлений и политики. Извлечение причинно-следственных связей из новостей, социальных медиа и других источников помогает аналитикам и исследователям лучше понимать социальные и политические процессы, их причины и последствия. Это может быть полезно для разработки политики и стратегий, направленных на решение социальных проблем.

- Интеллектуальные системы и автоматизация. Включение анализа причинно-следственных связей в интеллектуальные системы и роботов способствует созданию более автономных и умных систем, способных понимать и реагировать на окружающий мир более адекватно. Это открывает новые возможности для автоматизации различных процессов и задач.

Методы исследования. Для решения задачи автоматического извлечения причинно-следственных связей используются различные подходы и концепции. Практически все методы извлечения ПСС были построены в рамках двух больших концепций:

- Нестатистические методы.** Использовали построенные вручную лингвистические шаблоны. ПСС, не подходящие в выстроенные шаблоны, определялись некорректно, а зачастую просто игнорируются [1].
- Статистические и машинные методы.** Особенность методов этой концепции, в отличие от нестатистических методов, заключается в том, что методы сосредоточены на поиске шаблонов для извлечения ПСС [2].

Как показал анализ методов извлечения [1,2] нестатистические методы точны, но имеют сильную привязку к предметной области, машинные методы напротив хуже по точности, однако, не зависят от предметной области. Главным недостатком всех моделей является то, что они рассчитаны на один язык. Так же стоит упомянуть, что идея автоматических машинных методов извлечения ПСС предполагает наличия больших корпусов языка, таких как WordNet[3], VerbNet[4], TREC[5], Википедия и т.д.

В работе, опубликованной в 2013 году, Антонио Соргенте [6] описал один из методов автоматического извлечения ПСС. Идея автора заключается в извлечении из предложений набора S пар «причина-следствие»:

$$S = \{(C_1 E_1), (C_2 E_2), \dots, (C_i E_i)\} \quad (1)$$

где: $(C_i E_i)$ – i-ая пара «причина-следствие» в предложении S.

Метод состоит из 4 шагов.

Проверка на наличие шаблонов. Предложение проверяется на заранее определенных лексико-синтаксических шаблонах, наиболее уместных в предложениях с ПСС. Для успешного выполнения данного шага автор определил языковые конструкции, которые определяют структуру ПСС в предложении. Наиболее распространенными являются следующие конструкции:

Простые причинные глаголы – одиночные глаголы, имеющие возможность «воздействия» на объект (изменять, запускать, увеличивать, уменьшать и т. д.).

Фразовые глаголы – словосочетания, состоящие из глагола, за которым следует частица (например, привести к).

Существительные + предлог – выражения, состоящие из существительного, за которым следует предлог (например, причина в..).

Страдательные причинные глаголы – глаголы в страдательном залоге, за которыми следует предлог.

Одиночные предлоги – предлоги, которые могут использоваться для связи «причины» и «следствия», (например, от, после и так далее).

Анализ(парсинг) предложения. Если языковая конструкция в предложении найдена, то предложение анализируется с помощью парсера, чтобы выявить структуру и зависимости между словами.

Применение правил к найденному предложению. Если в каком-либо предложении была найдена языковая конструкция, то к нему применяются правила. Для каждой из категорий языковых конструкций автор определил свой набор заранее определенных правил, согласно которым определяются пары причина-следствие.

Основным же правилом для определения ПСС является:

$$\text{cause}(S, P, C) \wedge \text{effect}(S, P, E) \rightarrow cRel(S, C, E) \quad (2)$$

где: $\text{cause}(S, P, C)$ означает, что C является причиной в S в соответствии с шаблоном P, в то время как $\text{effect}(S, P, E)$ означает, что E является следствием в C по отношению к P.

Применение классификатора. Для уменьшения числа ложных пар, полученных из неоднозначных шаблонов, используется Байесовский классификатор, который помогает отсеять некорректные пары. В свою очередь фильтрация байесовским классификатором проводится также в несколько этапов. На этапе подготовки данных собираются наборы пар «причина-следствие», которые были извлечены из текста с помощью правил. Такие пары могут быть как потенциально правильными, так и неправильными. Так же на этом этапе проводится разметка данных. На этапе извлечения признаков извлекается набор

признаков, который будет использоваться для обучения классификатора. Признаки, согласно автору, включают в себя: лексические признаки - слова находящиеся между С и Е; семантические признаки - синонимы, гипонимы для С и Е и т.д.; зависимости прямые зависимости, определенные правилами, указанными выше. Обучение классификатора проходит в несколько важных этапов. На основе размеченных пар и извлеченных признаков генерируется обучающая выборка для обучения классификатора. Важными признаками являются оцененные вероятности. Так для каждого признака f , связанного с парой r , оценивается вероятность $P(f | c_i)$, где c_i – это класс [7]. В описываемом методе это два класса – причинный и не причинный.

Согласно Байесовскому классификатору, подсчитываются количества случаев, когда признак f встречается в причинных и не причинных парах затем делится на общее количество случаев. Важным моментом метода является возможность возникновения нулевых вероятностей для признаков и предотвращение их появления. Использование Лапласова сглаживания позволяет присвоить ненулевые вероятности даже тем признакам, которых нет в обучающей выборке. Классический классификатор выглядит следующим образом [8]:

$$P(c_i | r) = \frac{P(r)P(r | c_i)}{P(c_i)} \quad (3)$$

где: $P(r | c_i)$ - вероятность наблюдать пару r , если она принадлежит классу c_i , $P(c_i)$ - априорная вероятность класса c_i , $P(r)$ - общая вероятность наблюдать пару r .

Лапласово же преобразование добавляет небольшую константу (обычно 1) к числителю и знаменателю при оценке вероятности признака [9]:

$$P(f | c_i) = \frac{N(c_i | f) + \alpha}{N(c_i) + \alpha | F|} \quad (4)$$

где: $N(c_i | f)$ - количество случаев, когда признак f встречается в классе c_i ; $N(c_i)$ - общее количество случаев в классе c_i ; $|F|$ - общее количество уникальных признаков. α - сглаживающий параметр (обычно $\alpha=1$) [9].

Предлагаемая модель извлечения ПСС и модификация оригинального метода основывается на оригинальном методе, описанном выше, с учетом следующих изменений:

- удаление 4-го правила из рассматриваемых автором; правило было исключено в связи с небольшим дублированием с 3-им.
- увеличение количества слов-шаблонов; слова шаблоны были подобраны вручную по аналогии для каждого правила.
- описание правил и определение зависимостей при помощи современной библиотеки для расширенной работы с естественным языком; для определения зависимостей описанных автором правила были декларированы в модуле DependencyMatcher[10] из библиотеки Spacy[11].
- добавление дополнительного коэффициента multiplier для компенсации перекоса классифицируемых классов совместно с Лапласовым преобразование smoothing. Коэффициент добавляется в зависимости от частоты слова при сопоставлении слова со словарем Байса причинно-следственных предложений.

Основываясь на оригинальном алгоритме и предполагаемых модификациях, приведем структурную схему модели извлечения ПСС. Для удобства разделим схему на два этапа: подготовка данных и непосредственно обучение модели (рис. 1, 2).

Рассмотрим работу со словами-шаблонами и правилами подробней. Всего в оригинальном методе использованы 4 правила для определения зависимостей.



Рис. 1- Подготовка данных для модели извлечения
 Fig. 1- Preparing data for the extraction model

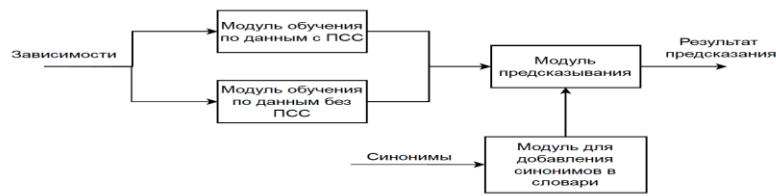


Рис. 2 - Структурная схема работы модели
 Fig. 2- Structural diagram of the model operation

Для каждого такого правила у автора оригинального метода представлено небольшое количество слов-шаблонов. Для предлагаемого метода количество слов-шаблонов увеличено в несколько раз исходя из типа самих правил. Опишем правила, формализованные автором, соответствующие этим правилам слова-шаблоны и декларирование правил в модуле DependencyMatcher.

1. Причинные глаголы. Простые одиночные причинные глаголы, имеющие значение причинно-следственного действия (увеличивать, уменьшать, генерировать и т. д.). Согласно правилу, у слова-шаблона в зависимостях должно быть прямое дополнение и внешнее подлежащее [6]:

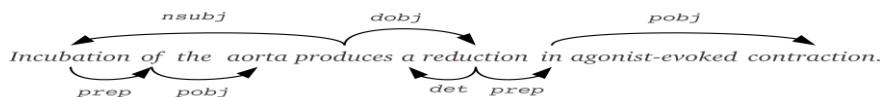


Рис. 3 - Зависимости между словами в предложении: «*Incubation of the aorta produces a specific reduction in agonist-evoked contraction*»

Fig. 3 - Relationships between words in the sentence: “Incubation of the aorta produces a specific reduction in agonist-evoked contraction”

Формализованное автором правило [6]:

$$\begin{aligned} \text{verb}(S, P, V) \wedge \text{nsubj}(S, V, C) &\rightarrow \text{cause}(S, P, C)(3) \\ \text{verb}(S, P, V) \wedge \text{dobj}(S, V, E) &\rightarrow \text{effect}(S, P, E)(4) \end{aligned}$$

Список слов-шаблонов для первого правила выглядит следующим образом:

(“cause”, “caused”, “causing”, “generate”, “generating”, “generated”, “triggers”, “trigger”, “triggered”, “make”, “makes”, “making”, “made”, “force”, “forces”, “forcing”, “require”, “requires”, “requiring”, “required”, “get”, “gets”, “got”, “getting”, “gotten”, “have”, “has”, “had”, “having”, “help”, “helping”, “helps”, “helped”, “hinder”, “hindered”, “hinders”, “afflict”, “afflicts”, “afflicted”, “permit”, “permits”, “permitted”, “permitting”, “let”, “letting”, “lets”, “allow”, “allowed”, “allows”, “enable”, “enables”, “enabled”).

Шаблон для DependencyMatcher первого правила:

```

pattern_one = [
    {
        "RIGHT_ID": "target",
        "RIGHT_ATTRS": {"ORTH": word}
    },
    {
        "LEFT_ID": "target",
        "REL_OP": ">",
        "RIGHT_ID": "cause",
        "RIGHT_ATTRS": {"DEP": "nsubj"}
    },
    {
        "LEFT_ID": "target",
        "REL_OP": ">",
        "RIGHT_ID": "effect",
        "RIGHT_ATTRS": {"DEP": "dobj"}
    }
]
    
```

Где: «ORTH» – это само слово, «DEP» – это каким членом предложения является слово. Чтобы задать шаблон в DependencyMatcher необходимо выбрать «слово-якорь», то есть по отношению к какому слову будут браться зависимости. Слово-якорь берётся из слов шаблонов, RIGHT_ID – это идентификатор слова внутри шаблона, LEFT_ID – это идентификатор родителя, по отношению к которому идёт поиск.

Как видно, у самого первого слова, которое имеет RIGHT_ID «target» нет LEFT_ID, так как это слово является «якорем», от него начинается поиск зависимостей, соответственно у него нет LEFT_ID.

REL_OP – означает какой тип зависимости должен быть между словами. «>» означает, что зависимость должна быть прямой, то есть в древе зависимостей между словами больше не должно быть слов.

2. Фразовые глаголы. Словосочетания, состоящие из глагола, за которым следует частица, а также существительные плюс предлог.

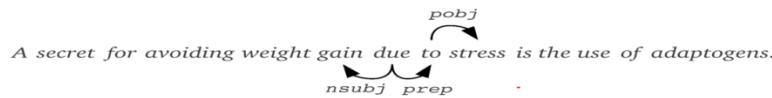


Рис. 4 - Зависимости между словами в предложении: “A secret for avoiding weight gain due to stress is the use of adaptogens”

Fig. 4 - Dependencies between words in a sentence: “A secret for avoiding weight gain due to stress is the use of adaptogens”

Формализованное автором правило выглядит следующим образом:

$$\text{prep_verb}(S, P, \text{due}) \wedge \text{prep}(S, \text{due}, \text{to}) \wedge \text{pobj}(S, \text{to}, C) \rightarrow \text{cause}(S, P, C) \quad (5)$$

Подобранный список слов-шаблонов:

(“result”, “resulted”, “results”, “cause”, “caused”, “causing”, “lead”, “leads”, “leading”, “led”, “break”, “broke”, “broke”, “breaks”, “grow”, “grew”, “grown”, “growing”, “act”, “acted”, “acts”, “acting”, “call”, “called”, “calls”, “calling”, “handed”, “hand”, “hands”, “handing”, “think”, “thinking”, “thought”, “one”, “ones”, “add”, “adds”, “adding”, “added”, “be”, “been”, “blow”, “blown”, “blew”, “blowing”, “blows”, “force”, “forced”).

И частиц к ним:

(“in”, “of”, “to”, “up”, “down”, “out”, “off”, “after”, “on”, “by”, “upon”, “for”, “with”, “around”, “over”, “out”, “away”, “about”, “along”, “into”, “through”, “forth”).

Выведем шаблон для DependencyMatcher:

```
Pattern_two = [
    {
        "RIGHT_ID": "target",
        "RIGHT_ATTRS": {"ORTH": word}
    },
    {
        "LEFT_ID": "target",
        "REL_OP": ">",
        "RIGHT_ID": "particle",
        "RIGHT_ATTRS": {"DEP": "prep"}
    },
    {
        "LEFT_ID": "target",
        "REL_OP": ">",
        "RIGHT_ID": "cause",
        "RIGHT_ATTRS": {"DEP": "nsubj"}
    },
    {
        "LEFT_ID": "particle",
        "REL_OP": ">",
        "RIGHT_ID": "effect",
        "RIGHT_ATTRS": {"DEP": "pobj"}
    }
]
```

3. Пассивные причинные глаголы. Слово-шаблон в зависимостях должно иметь agent (какая-либо сущность, исполняющая действие) и существительное или местоимение, которое является субъектом действия, выполняемого над ним. Формализованное правило:

$$\text{passive}(S, P, V) \wedge \text{agent}(S, V, C) \rightarrow \text{cause}(S, P, C) \quad (6)$$

$$\text{passive}(S, P, V) \wedge \text{nsubjpass}(S, V, E) \rightarrow \text{effect}(S, P, E) \quad (7)$$

Слова-шаблоны:

("caused", "generated", "triggered", "made", "forced", "required", "helped", "permitted", "let", "allowed")

Шаблон для DependencyMatcher:

```
pattern_three = [
{
    "RIGHT_ID": "target",
    "RIGHT_ATTRS": {"ORTH": word}
},
{
    "LEFT_ID": "target",
    "REL_OP": ">",
    "RIGHT_ID": "cause",
    "RIGHT_ATTRS": {"DEP": "agent"}
},
{
    "LEFT_ID": "target",
    "REL_OP": ">",
    "RIGHT_ID": "effect",
    "RIGHT_ATTRS": {"DEP": "nsubjpass"}
},
]

```

Обсуждение результатов. Для тестирования модели был взят набор из 655 предложений с причинно-следственной связью и 2389 предложений без причинно-следственной связи. Для возможности сравнения двух методов между собой тренировочные и тестовые данные были взяты из одного и того же источника, что и оригинальный метод. Метрики также были выбраны такие же как у оригинального метода. Основные метрики для проверки работы стали: accuracy, precision и recall. Для расчёта метрик разработанного метода модель прошла 105 циклов теста с различными параметрами multiplier (от 0 до 10 с шагом в 0.5) и smoothing (от 0 до 5):

	Accuracy	Precision	Recall	F-score	Multiplier	Smoothing
0	0.773325	0.093130	0.388539	0.150248	0.0	1.0
1	0.765440	0.134351	0.374488	0.197753	0.0	2.0
2	0.751314	0.149818	0.328859	0.205686	0.0	3.0
3	0.746072	0.164888	0.320475	0.217742	0.0	4.0
4	0.736202	0.183209	0.309278	0.230105	0.0	5.0
...
100	0.781637	0.774046	0.495117	0.603931	10.0	1.0
101	0.770368	0.784733	0.479478	0.595252	10.0	2.0
102	0.754271	0.760840	0.458813	0.580717	10.0	3.0
103	0.748029	0.792389	0.451304	0.575099	10.0	4.0
104	0.736173	0.792388	0.439831	0.565988	10.0	5.0

105 rows x 6 columns

Рис. 5 - Расчет метрик для модифицированного метода извлечения ПСС в среде исполнения Jupyter Notebook

Fig. 5 - Calculation of metrics for the modified PSS extraction method in the Jupyter Notebook runtime environment

Ниже приведены расчеты всех трех метрик и их графиков при различных значениях smoothing и multiplier (рис. 6-20)

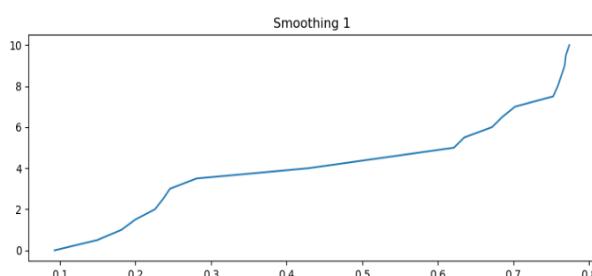


Рис. 6. - График precision для Smoothing 1
Fig. 6. - Precision graph for Smoothing 1

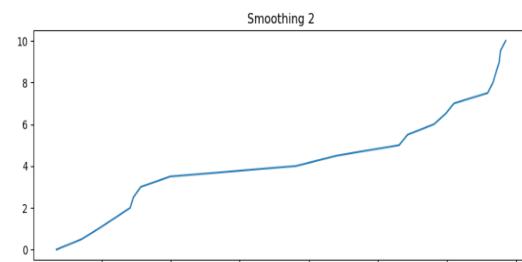


Рис.7- График precision для Smoothing 2
Fig.7- Precision graph for Smoothing 2

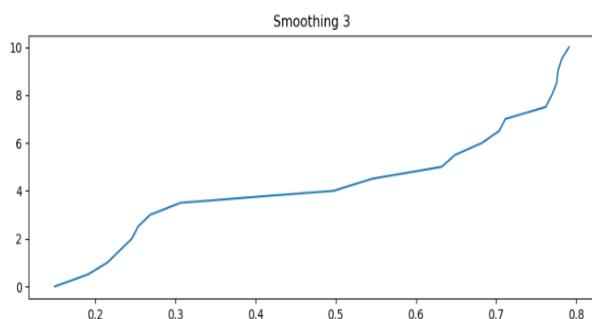


Рис. 8 - График precision для Smoothing 3
 Fig. 8 - Precision graph for Smoothing 3

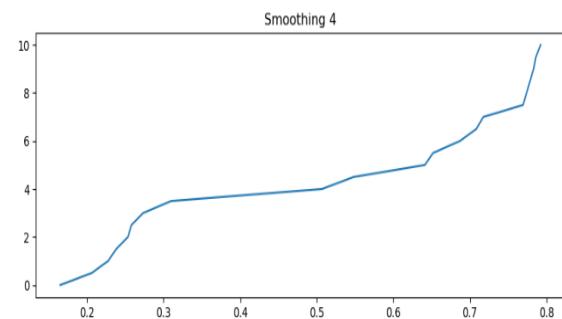


Рис. 9- График precision для Smoothing 4
 Fig. 9 -Precision graph for Smoothing 4

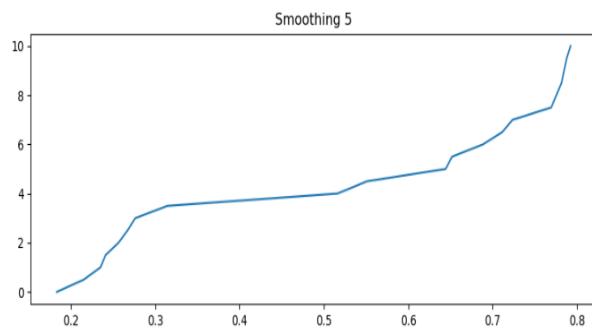


Рис. 10 - График precision для Smoothing 5
 Fig. 10 - Precision graph for Smoothing 5

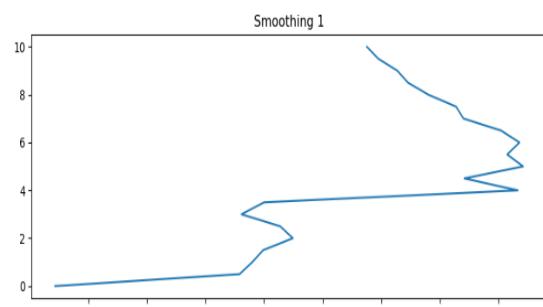


Рис. 11 - График recall для Smoothing 1
 Fig. 11 - Recall schedule for Smoothing 1

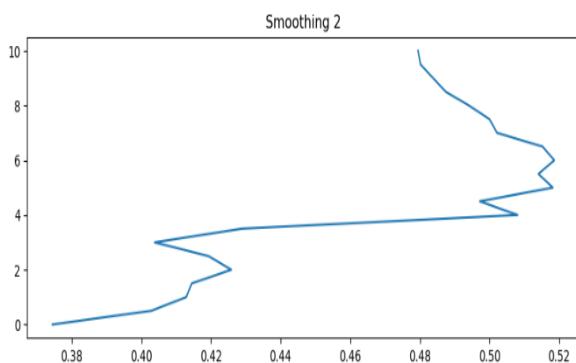


Рис. 12- График recall для Smoothing 2
 Fig. 12- Recall chart for Smoothing 2

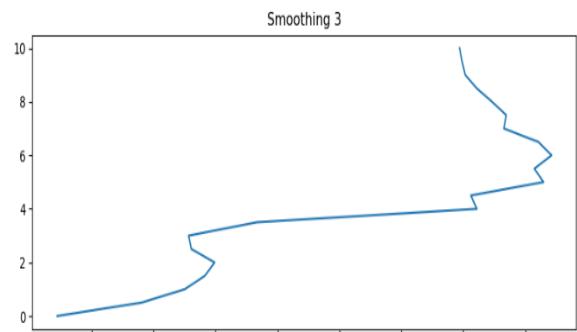


Рис. 13 - График recall для Smoothing 3
 Fig. 13 - Recall chart for Smoothing 3

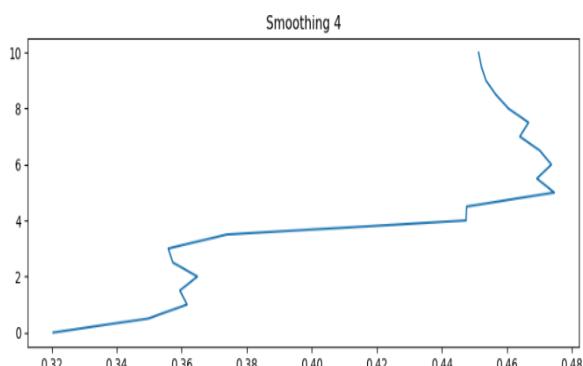


Рис. 14 - График recall для Smoothing 4
 Fig. 14 - Recall chart for Smoothing 4

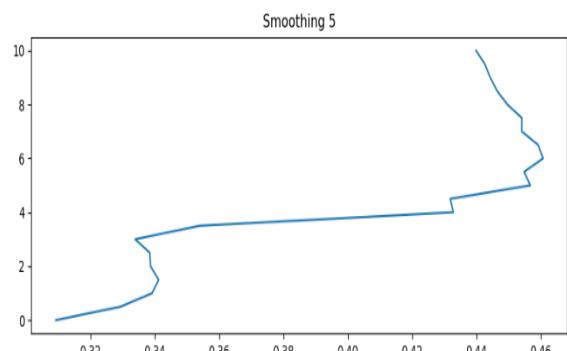


Рис. 15 -График recall для Smoothing 5
 Fig. 15 - Recall chart for Smoothing 5

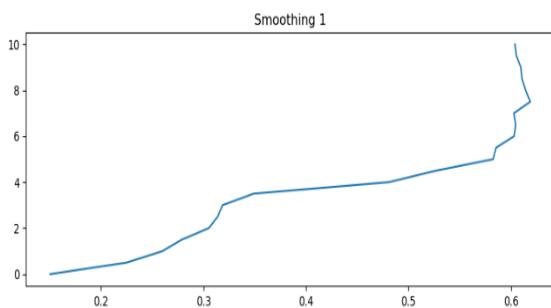


Рис. 16-График F-score для Smoothing 1
 Fig. 16-F-score graph for Smoothing 1

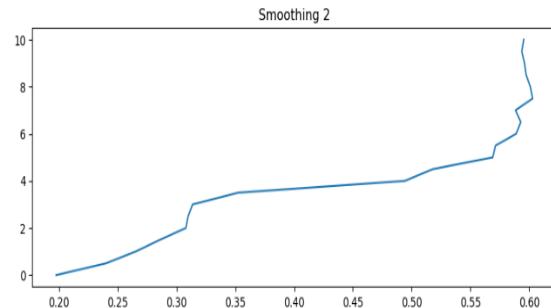


Рис.17-График F-score для Smoothing 2
 Fig. 17-F-score graph for Smoothing 2

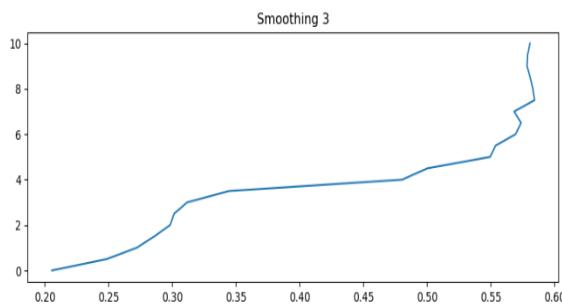


Рис. 18 - График F-score для Smoothing 3
 Fig. 18 - F-score chart for Smoothing 3

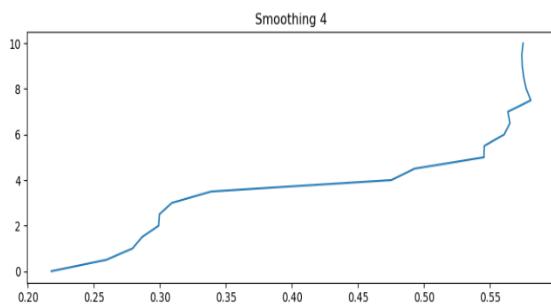


Рис.19- График F-score для Smoothing 4
 Fig. 19 - F-score graph for Smoothing 4

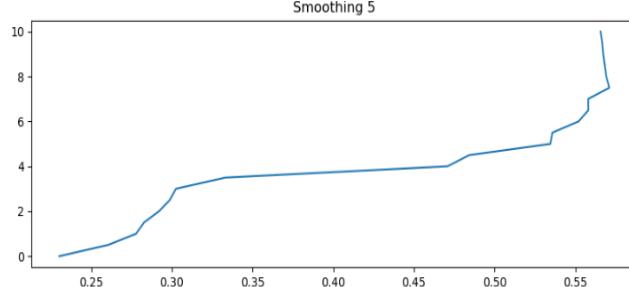


Рис. 20 - График F-score для Smoothing 5
 Fig. 20 - F-score chart for Smoothing 5

Достигнутые результаты Антонио Соргенте приведены на скрине из оригинальной статьи:

	Precision	Recall	F-score	α
Global	49%	66%	56%	
Per sentence	56%	67%	61%	no filter
Global	55%	65%	59%	
Per sentence	59%	66%	62%	0
Global	71%	58%	63%	
Per sentence	72%	57%	64%	0.2
Global	70%	54%	61%	
Per sentence	70%	53%	60%	0.5
Global	70%	56%	63%	
Per sentence	71%	56%	62%	0.7
Global	71%	54%	62%	
Per sentence	72%	54%	61%	1

Рис. 21 - Скрин таблицы из оригинальной статьи с достигнутыми метриками
 Fig. 21 - Screenshot of the table from the original article with achieved metrics

Как видно из рис. 21 максимально высокие результаты по метрикам это:

Precision – 71%; Recall – 58%; F-score – 63%

Наилучшие показатели по метрикам на тренировочных данных были достигнуты при использовании следующих коэффициентов: smoothing – 1, multiplier – 8:

F-score – 0.64%; Precision – 0.76%; Recall – 53%

Видно, что модифицированный метод просел немного по метрике recall. Исходя из того что precision можно интерпретировать как долю объектов, названных классификатором положительными и при этом действительно являющимися положительными, а recall показывает, какую долю объектов положительного класса из всех объектов положительного класса нашел

алгоритм, в принципе работу классификатора можно считать хорошей. Небольшая просадка по recall не скажется на определении ПСС. Однако модель по другим метрикам превысила оригинальный метод. На тестовых данных достигнуты следующие показатели:

F-score – 0.65%; Precision – 0.76%; Recall – 59%

На тестовых данных метод показал лучшие результаты. Как видно просевшая метрика recall выровнялась. Можно сделать вывод, что метод успешно справляется с поставленной работой. К недостаткам можно отнести большое время обучения модели. Около трех часов на имеющихся тренировочных данных.

По результатам обучения и тестирования можно обозначить следующие шаги для улучшения работы модели в целом:

1. Для улучшения показателей и скорости обучения однозначно необходимо ликвидировать перекос классов в тренировочных данных и тестовых данных с одновременным увеличением самого набора данных. Для этого необходимо с помощью экспертов собрать предложения с наличием ПСС и их отсутствием. При этом синтетические данные не подойдут, так как после обучения система будет давать хорошие результаты на синтетических тестовых данных, а на реальных - метрики резко упадут.
2. Для уменьшения времени обучения уже на большем наборе данных необходимо продумать и внедрить систему накопления данных об обучении на внутренней памяти. Это позволит запускать обучение каждый раз не с 0.
3. Для более тщательного анализа необходимо уменьшить шаг коэффициента multiplier с 1 до 0,1. Возможно имеет смысл и меньше.
4. Разбить основные правила для извлечения на более мелкие.
5. Нужна проверка с использованием других видов сглаживаний, например сглаживание Котта или сглаживание на основе кросс-валидации.

Вывод. В данной статье описан метод извлечения причинно-следственных связей. Метод основан на предложенном Антонио Соргенте.

Метод предполагает комбинированное использование статистических данных и машинных методов. Оригинальный метод был модифицирован переводом работы метода на современные библиотеки, такие как NLTK и Spacy. Правила, сформированные автором, были переработаны и добавлены в модуль Dependency Matcher библиотеки Spacy. Количество ключевых слов по каждому правилу были увеличены.

Метод так же предполагает учет синонимов, подсчет Байесовской статистики и сглаживание Лапласа для нулевых вероятностей. Исходя из разности данных с ПСС и без, был введен коэффициент multiplier для компенсации перекоса классов в данных.

Разработанный метод был протестирован на исходных данных оригинального метода. Описываемый в статье метод показал улучшенные метрики относительно оригинального метода на тренировочных данных, хотя метрика recall была хуже относительно оригинального. Однако как показали тестовые данные описываемый метод по всем метрикам оказался лучше. В статье приведены пути дальнейшего развития метода.

Библиографический список:

1. Штанчаев Х.Б. Нестатистические методы автоматического извлечения причинно-следственных связей из текста / Х.Б. Штанчаев // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2023. – № 2(232). – С. 273-280. – DOI 10.18522/2311-3103-2023-2-273-280. – EDN JZUBSO.1
2. Штанчаев, Х.Б. Статистические и машинные методы автоматического извлечения причинно-следственных связей из текста (обзор) / Х.Б. Штанчаев // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2023. – № 6(236). – С. 105-114. – DOI 10.18522/2311-3103-2023-6-105-114. – EDN TBHUWW.
3. Fellbaum, Christiane (2005). WordNet and wordnets. In: Brown, Keith et al. (eds.), Encyclopedia of Language and Linguistics, Second Edition, Oxford: Elsevier, 665-670.
4. VerbNet. A Computational Lexical Resource for Verbs. Интернет-ресурс. Способ доступа - <https://verbs.colorado.edu/verbnet>

5. Text Rettieval Conference(TREC). Интернет-ресурс. Способ доступа - https://en.wikipedia.org/wiki/Text_Retrieval_Conference
6. G.V. a. F.M. Antonio Sorgente, "Automatic extraction of cause-effect relations in," Institute of Cybernetics "Eduardo Caianiello" of the National Research Council, Январь 2013.
7. L.A. Dalton, E.R. Dougherty. Optimal Bayesian Classification, SPIE--The International Society for Optical Engineering, 2020, 363p.
8. Sayed, A.H. Inference and Learning from Data: Learning. Cambridge: Cambridge University Press. – 2022, Chapter 55, 2341-2356
9. Ananda P. Noto, Dewi R.S. Saputro; Classification data mining with Laplacian Smoothing on Naïve Bayes method. AIP Conf. Proc. 28 November 2022; 2566 (1): 030004.
10. Dependency Matcher Интернет-ресурс. Способ доступа - <https://spacy.io/usage/rule-based-matching#dependencymatcher>.
11. SpaCy 101. Все что нам нужно знать. Интернет-ресурс. Способ доступа - <https://webdevblog.ru/spacy-101-vse-cto-vam-nuzhno-znat-chast-1>
12. Метрики качества моделей бинарной классификации. Интернет-ресурс. Способ доступа - <https://loginom.ru/blog/classification-quality>.

References:

1. Shtanchaev H.B. Non-statistical methods of automatic extracting causal relationship from text// H.B. Shtanchaev. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki*. 2023;2(232):273-280. – DOI 10.18522/2311-3103-2023-2-273-280. – EDN JZUBSO.1. (In Russ)
2. Shtanchaev, H.B. Statistical methods of automatic extracting causal relationship from text(review)// H.B. Shtanchaev. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki*. 2023;6(236):105-114. – DOI 10.18522/2311-3103-2023-6-105-114. – EDN TBHUWW. (In Russ)
3. Fellbaum, Christiane (2005). WordNet and wordnets. In: Brown, Keith et al. (eds.), Encyclopedia of Language and Linguistics, Second Edition, Oxford: Elsevier, 665-670.
4. VerbNet. A Computational Lexical Resource for Verbs. Internet-resurs. Sposob dostupa - <https://verbs.colorado.edu/verbnet/>
5. Text Rettieval Conference(TREC). Internet-resurs. Sposob dostupa - https://en.wikipedia.org/wiki/Text_Retrieval_Conference
6. G.V. a. F.M. Antonio Sorgente. Automatic extraction of cause-effect relations in. Institute of Cybernetics "Eduardo Caianiello" of the National Research Council, Yanvar' 2013.
7. L.A. Dalton, E.R. Dougherty. Optimal Bayesian Classification, SPIE--The International Society for Optical Engineering, 2020:363p.
8. Sayed, A.H. Inference and Learning from Data: Learning. Cambridge: Cambridge University Press. – Chapter 55, 2022:2341-2356
9. Ananda P. Noto, Dewi R.S. Saputro; Classification data mining with Laplacian Smoothing on Naïve Bayes method. AIP Conf. Proc. 28 November 2022; 2566 (1): 030004.
10. Dependency Matcher Internet-resurs. Sposob dostupa - <https://spacy.io/usage/rule-based-matching#dependencymatcher>.
11. SpaCy 101. Vse chto nam nuzhno znat'. Internet-resurs. Sposob dostupa - <https://webdevblog.ru/spacy-101-vse-cto-vam-nuzhno-znat-chast-1>
12. Metrics of binary classification. Internet.Link - <https://loginom.ru/blog/classification-quality> (In Russ)

Сведения об авторах:

Штанчайев Хайрутин Баширович, кандидат технических наук, доцент, кафедра программного обеспечения вычислительной техники и автоматизированных систем, старший инженер АСУТП; shtanchaev.h@gmail.com

Мугутдинов Залибек Темирланович, аспирант, кафедра программного обеспечения вычислительной техники и автоматизированных систем; zalik737@mail.ru

Information about authors:

Hairutin B. Shtanchaev, Cand. Sci. (Eng), Assoc. Prof., Department of Software for Computer Engineering and Automated Systems, Senior Engineer of APSCS; shtanchaev.h@gmail.com

Zalibek T. Mugutdinov, Postgraduate Student, Department of Software for Computer Engineering and Automated Systems; zalik737@mail.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 31.10.2024.

Одобрена после/рецензирования Revised 27.11.2024.

Принята в печать/Accepted for publication 15.01.2025.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 004.056.5



DOI: 10.21822/2073-6185-2025-52-1-173-182 Оригинальная статья /Original article

Разработка программного модуля для автоматизации процесса расчёта водопотребления и водоотведения с использованием среды разработки DYNAMO STUDIO

Т.А. Юрошева¹, А.В. Калиниченко²

¹Северо – Кавказский горно-металлургический институт
(Государственный технологический университет),

¹362021, г. Владикавказ, ул. Николаева, 44, Россия,

²Северо – Осетинский государственный университет
имени Коста Левановича Хетагурова,

²362025 г. Владикавказ, ул. Ватутина, 44-46, Россия,

Резюме. Цель. Целью исследования является создания скрипта для автоматизации процессов расчета водопотребления и водоотведения с использованием среды разработки DYNAMO STUDIO. **Метод.** Решение современных задач в области автоматизированного проектирования предполагает последовательную реализацию двух видов процессов алгоритмизация и визуализация. **Результат.** Представлены и описаны методики работы сценариев Dynamo, позволяющие существенно ускорить процессы расчета водоснабжения и водоотведения, а также процесс подготовки проектной документации. Принципы информационного моделирования позволяют увеличить скорость выполняемой проектной работы и избежать широкого ряда ошибок при проектировании, что в дальнейшем не приведет к соответствующим проблемам на этапе строительства объекта. Представлены результаты применения разработанных алгоритмов для автоматизации процесса расчёта водопотребления и водоотведения. **Вывод.** Использование среды разработки Dynamo Studio позволяет создавать эффективные программные модули для автоматизации расчётов водопотребления и водоотведения. Это позволит повысить качество проектирования и сокращает время на выполнение рутинных задач.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, водопотребление, водоотведение, визуальное программирование, программный код, информационная модель, скрипт

Для цитирования: Т.А. Юрошева, А.В. Калиниченко. Разработка программного модуля для автоматизации процесса расчёта водопотребления и водоотведения с использованием среды разработки DYNAMO STUDIO. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025; 52(1):173-182. DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-1-173-182

Development of a software module for automating the process of calculating water consumption and water disposal using the DYNAMO STUDIO development environment

T.A. Yurosheva¹, A.V. Kalinichenko²

¹ North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University),

¹44 Nikolaeva St., Vladikavkaz 362021, Russia,

² Kosta Levanovich Khetagurov North Ossetian State University,

²44-46 Vatutina St., Vladikavkaz 362025, Russia

Abstract. Objective. The aim of the study is to create a script for automating the processes of calculating water consumption and water disposal using the DYNAMO STUDIO development environment. **Method.** Solving modern problems in the field of automated construction design involves the consistent implementation of two types of processes: algorithmization and visualization. **Result.** The methods of operation of Dynamo scenarios are presented and

described, which significantly speed up the calculation of water supply and sanitation, as well as the process of preparing project documentation. The principles of information modeling allow to increase the speed of design work and avoid a wide range of errors during design, which will not lead to corresponding problems at the stage of construction of the facility. The results of the application of the developed algorithms for automating the calculation of water consumption and sanitation are presented. **Conclusion.** Using the Dynamo Studio development environment allows you to create effective software modules for automating calculations of water consumption and sanitation. This will improve the quality of design and reduce the time required to complete routine tasks.

Keywords: computer modeling, water consumption, sanitation, visual programming, program code, information model, script

For citation: T.A. Yurosheva, A.V. Kalinichenko. Development of a software module for automating the process of calculating water consumption and water disposal using the DYNAMO STUDIO development environment. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2025; 52(1):173-182. (In Russ) DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-1-173-182.

Введение. Процесс проведения расчетов водопотребления, водоотведения и гидравлики являются трудоемкими процессами, с которыми приходится сталкиваться инженерам раздела водоснабжения и водоотведения. Расчет водопотребления и водоотведения подразумевает под собой составление таблицы баланса воды потребляемым объектом и объемом сброшенных сточных вод. Необходимость проведения расчета по водопотреблению и водоотведению возникает на стадии разработки проектной документации ВК (водоснабжение и канализация), НВК (наружные сети водоснабжения и канализации). По результатам расчетов баланса водопотребления и водопотребления искомая таблица размещается на лист общих данных проекта. Балансовая таблица позволяет заключить договор с ГУП «Водоканал».

Автоматизация расчетов баланса водопотребления, водоотведения считается незаменимыми для инженеров при разработке проектов водоснабжения и водоотведения, помогая быстро и безошибочно выполнить однотипные вычислительные операции.

Постановка задачи. Существует множество программных комплексов, позволяющих в той или иной степени выполнять расчеты баланса систем и гидравлики. Программы могут проводить расчеты, как независимо от разрабатываемого проекта, предполагая дублирование исходной информации, так и взаимодействия напрямую с информационной моделью. Однако, далеко не все программы способны выполнять расчеты на основании действующих нормативно-правовых документов или учитывать специфику проектируемого объекта, а то и вовсе оттолкнуть покупателя высокими ценами на продукцию.

Данное обстоятельство определило целесообразность проведения исследования, целью которого является создания скрипта для автоматизации процессов расчета водопотребления и водоотведения на основе информационной модели жилого многоквартирного дома. Для достижения указанной цели в рамках исследования были поставлены и решены следующие задачи:

1. Оценить возможность применения среды визуального программирования при разработке информационной модели проектируемой строительной конструкции замкнутого типа.
2. Создание обобщенного алгоритма проектирования программного модуля для автоматизации процесса расчёта водопотребления и водоотведения, с использованием средств автоматизации в составе программных сред строительного проектирования.
3. Реализация разработанного алгоритма на практическом примере.

Методы исследования. Решение современных задач в области автоматизированного строительного проектирования предполагает последовательную реализацию двух видов процессов:

Алгоритмизация – заключается в разработке алгоритма как набора инструкций, последовательное выполнение которых на основе данных, задаваемых пользователем (имплементация), в соответствующей программной среде обеспечит построение модели строительного объекта или его отдельных элементов в информационном аспекте – в виде массивов данных и различных взаимосвязей между ними. В наиболее общем случае обеспечивается визуальными редакторами программирования, зачастую являющимися надстройками для программных сред трехмерного моделирования.

Визуализация – предполагает графическую интерпретацию (как правило, в трехмерном пространстве) информационной модели строительного объекта или его отдельных элементов как результата выполнения алгоритма. В наиболее общем случае обеспечивается современными программными средами трехмерного моделирования.

Объектом автоматизации являются системы хозяйствственно-питьевого водопровода и хозяйствственно-бытовой канализации рассчитываемого объекта.

Актуальность данной работы состоит в том, что автоматизация расчёта водопотребления и водоотведения гидравлического расчета позволяет произвести расчет системы на основе разработанного проекта ВК в ПО Revit.

Разработка информационной модели АР (архитектурные решения). Системы водоснабжения и водоотведения как правило разрабатываются на основе архитектурных решений. В том случае, если архитектурные решения отсутствуют, принимаются конструктивные решения [1-2]. При моделировании любых физических объектов в Revit, элементы должны иметь привязку. В качестве привязки обычно выступают архитектурные элементы уровней.

Для размещения сложным семейств, например, насосного оборудования или сантехнических приборов может потребоваться основа или грань для их размещения. В качестве основы или грани могут служить такие несущие и ненесущие элементы, как перекрытия, стены, колонны и т.д. Ввиду того, что акцент работы направлен на расчет систем водоснабжения и водоотведения, нет необходимости в подробном рассмотрении архитектурных решений. Результат разработки информационной модели АР многоквартирного жилого дома представлен на рис. 1.

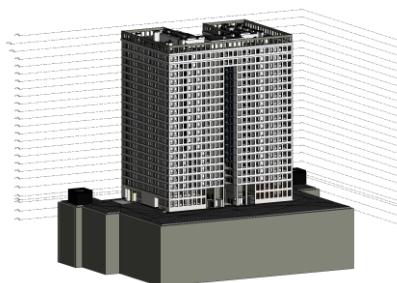


Рис. 1 - Информационная модель АР
Fig. 1 - AR information model

При разработке информационной модели раздела ВК принято разделять модель на составляющие по проектируемым системам. В качестве основным систем были определены: В1 – хозяйствственно-питьевой водопровод, Т3 – горячий водопровод, К1 – хозяйственно-бытовая канализация, К2 – ливневая канализация.

Неизолированные трубопроводы систем отопления, теплоснабжения, внутреннего холодного и горячего водоснабжения не должны примыкать к поверхности строительных конструкций [1]. Смоделированная система хозяйствственно-питьевого водопровода отображает разводку трубопроводов и подключение потребителей к данной сети в соответствии с проектом. В качестве трубопровода использовались трубы из полипропилена, армированные стекловолокном, SDR 7,6. Из размещенных потребителей представлены: унитазы, умывальники, мойки, стиральные машины, ванные. Результат моделирования системы В1 представлен на рис. 2.

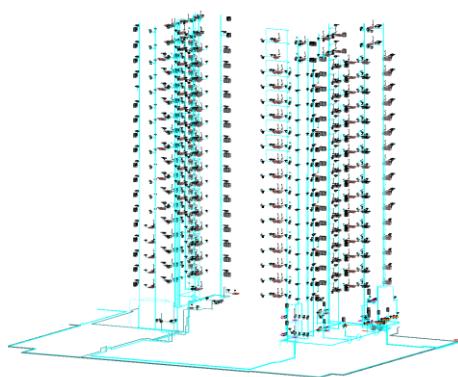


Рис. 2 - Информационная модель ВК системы В1
Fig. 2 - Information model of the VK system B1

Смоделированная система горячего водоснабжения отображает разводку трубопроводов и подключение потребителей к данной сети в соответствии с проектом. В качестве трубопровода использовались трубы из полипропилена, армированные стекловолокном, SDR 6. Из размещенных потребителей представлены: умывальники, мойки, ванные. Ввиду того, что к унитазам и стиральным машинам отсутствует подключение горячего водоснабжения, они были скрыты. Результат моделирования системы ТЗ представлен на рис. 3.

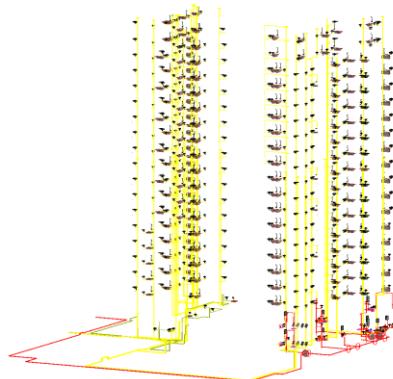


Рис. 3 - Информационная модель ВК системы Т3
Fig. 3 - Information model of the T3 VK system

Системы К1 и К2 выполнены из чугунных трубопроводов по ГОСТ 6942-98, производителем SML. Разводка систем выполнена согласно рабочей документации соответствующих комплектов. Из размещенных потребителей представлены: унитазы, умывальники, мойки, стиральные машины, ванные для системы К1, а также трапы для системы К2. Результат моделирования систем К1 и К2 представлен на рис. 4.

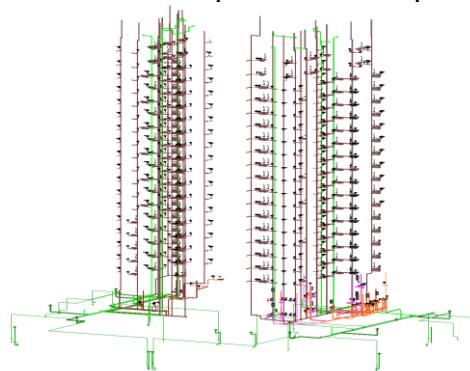


Рис. 4 - Информационная модель ВК систем К1 и К2
Fig. 4 - Information model of the VK systems K1 and K2

Обсуждение результатов. Разработка блока скрипта для расчета водопотребления и водоотведения. Выборка значений для расчета водопотребления и водоотведения.

В качестве исходных данных принимаются таблицы и иная информация из нормативно-правовых документов. Dynamo позволяет обрабатывать информацию представленную в Excel при помощи нодов «Import/Export.From.Excel». Именно таким способом информация будет поступать на расчетные блоки скрипта [2]. Для проведения гидравлического расчета и расчета водопотребления и водоотведения потребуется таблица Б.2 - Значения коэффициентов $\alpha(\alpha_{hr})$ при $P(P_{hr})$ и любом числе N из СП.30.13330.2020 приложения Б. Данные формируются на отдельном листе Excel, где в разрабатываемой таблице $j=0$ присваивается значение α , для $j=1 P$.

Для расчета баланса систем берутся расчетные данные расхода воды потребителями из СП.30.13330.2020. Данные формируются на отдельном листе Excel, где в разрабатываемой таблице $j=0$ присваивается значение типа водопотребителя, для $j=1$ – единица измерения, для $j=2$ – общий расчетный расход воды в литрах среднесуточный $q_{u,m}^{tot}$, для $j=3$ – расчетный расход горячей воды в литрах среднесуточный $q_{u,m}^h$, для $j=4$ – общий расчетный расход наибольшего водопотребления в час $q_{hr,u}^{tot}$, для $j=5$ – расчетный расход наибольшего горячего водопотребления в час $q_{hr,u}^h$, для $j=6$ – общий расход прибором л/с, для $j=7$ – общий расход прибором л/ч, для $j=8$ – холодной или горячей расход прибором, $j=9$ – время эксплуатации объекта в часах T .

Расчетные расходы воды потребителями из СП.30.13330.202 загружается в виде файла Excel. Dynamo позволяет получить значения из файла Excel и передать их в виде списка на скрипт. В нод «FilePath» указывается значение пути искомого файла Excel, тогда как «FilefromPath» принимает на вход значение path и передает «file» на нод «Data.ImportExcel». В «CodeBlocks» указывается строковое значение листа, который будет считываться в Excel. Ноды «Boolean» являются нодами, которые отвечают за ручное назначение True/False. Нод «Data.ImportExcel» запрашивает на вход: «readAsString», где при указании True, полученными значения будут являться строковыми и «showExcel», где при указании True, будет открываться Excel файл. В обоих случаях указывается False. [3-5] После того, как данные были получены из Excel, необходимо транспонировать матрицу. Транспонирование производится при помощи нода «List.Transpose». Данные действия наглядно представлены на рис. 5.

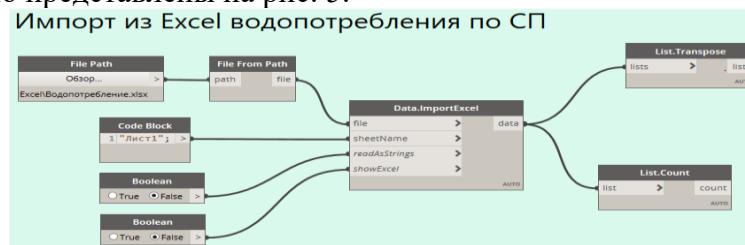


Рис. 5 - Импорт значений из Excel
 Fig. 5 - Importing values from Excel

Для дальнейших расчетов водопотребления и водоотведения понадобятся: среднесуточные расходы воды общий/горячий - $q_{u,m}^{tot}/q_{u,m}^h$, в час наибольшего водопотребления общий/горячий - $q_{hr,u}^{tot}/q_{hr,u}^h$, расход прибором секундный/часовой - q_0^{tot}/q_0^h . Ноды «Среднесуточное потребление по СП», «Получение в час наибольшего водопотребления по СП», «Расход воды прибором с по СП», «Расход воды прибором ч по СП» являются переименованными нодами «PythonScript». Данные действия представлены на рис. 6.

Общее правило выборки для всех данных является одинаковым. Переменная inSPList принимает на себя расчетные значения расходов воды потребителями, переменная inBuildingType забирает строковое значение типа здания, назначенное пользователем в ноде «Тип здания по СП». Если переменная inBuildingType совпадает с элементом списка inSPList, в таком случае берется значение из нужной колонки [6].

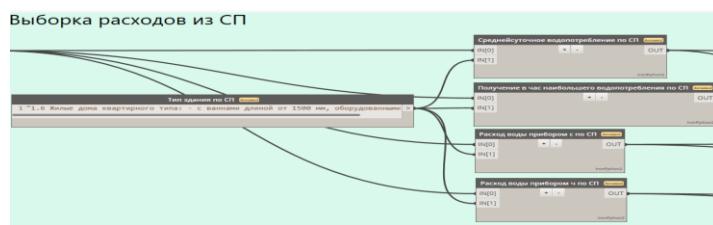


Рис. 6 - Выборка расходов
 Fig. 6 - Sample of expenses

Цикл повторяется до тех пор, пока не будет пройден весь список значений. Пример реализации для определения $q_{u,m}^{tot}$ представлен на рис. 7.

```

1 # Загрузить стандартную библиотеку Python и библиотеку DesignScript
2 import sys
3 import clr
4 clr.AddReference('ProtoGeometry')
5 from Autodesk.DesignScript.Geometry import *
6
7 # Введенные в этом узле данные сохраняется в виде списка в переменных IN.
8 dataEnteringNode = IN
9 inListSP = IN[0]
10 inBuildingType = IN[1]
11 outList = OUT()
12
13 # Введите код под этой строкой
14 i=0
15 j=0
16 strInBuildingType = str(inBuildingType)
17
18 for i in range(0, len(inListSP)):
19     if strInBuildingType == str(inListSP[i]):
20         outList.append(inListSP[i][j])
21     else:
22         j = j + 1
23     i = i + 1
24
25 # Нажмите выход переменной OUT.
26 OUT = outList
    
```

Рис. 7 - Код Python среднесуточное водопотребление
 Fig. 7 - Python code average daily water consumption

Для дальнейших расчетов понадобятся исходные данные, которые пользователь должен внести самостоятельно. К таким данным относятся: общее количество жильцов - U , общее количество потребителей - N , максимальный расход прибором - q . Ноды для заполнения входных данных представлены на рис. 8.

Входные данные

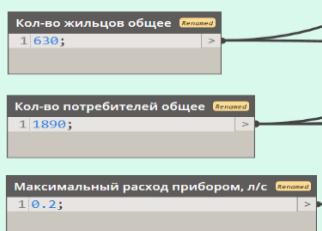


Рис. 8 - Входные данные блока расчета водопотребления и водоотведения
 Fig. 8 - Input data of the water consumption and water disposal calculation block

Нахождение максимального секундного расхода q , требует рассчитать вероятность действия потребителей P^{tot} и определить коэффициент α от $N \times P$. Данные действия представлены на рис. 9.

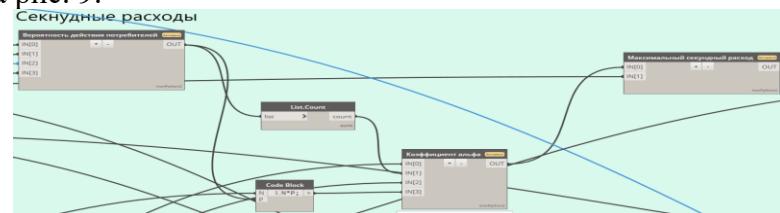
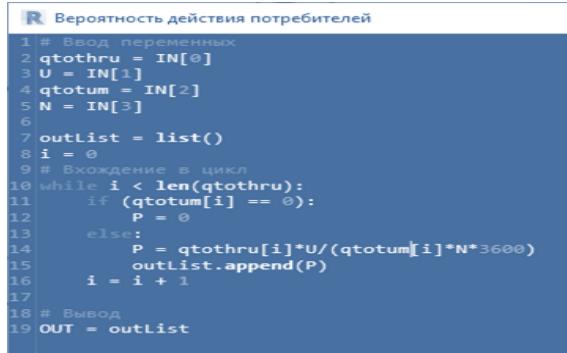


Рис. 9 - Ноды для расчета максимального секундного расхода
 Fig. 9 - Nodes for calculating the maximum second flow rate

Вероятность действия потребителей P^{tot} , определяется по формуле 1. За расчет P^{tot} отвечает нод «Вероятность действия потребителей», который является переименованным нодом «PythonScript». Переменная q_{tot} принимает значение в час наибольшего водопотребления - $q_{hr,u}^{tot}$, переменная U – количество жильцов U , назначенное пользователем, q_{totum} – среднесуточное водопотребление $q_{u,m}^{tot}$. Код реализации расчетов представлен на рис. 10.

$$P^{tot} = \frac{q_{u,m}^{tot} \times U}{q_0^{tot} \times N \times 3600}, \quad (1)$$

где: $q_{u,m}^{tot}$ – расход воды общий м³/ч; q_0^{tot} – расход прибором общий воды л/с; U – количество жителей проектируемого здания; N – количество потребителей проектируемого здания.



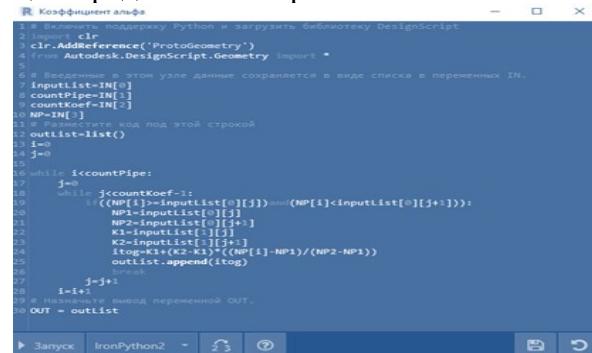
```

1. # Ввод переменных
2. qtothru = IN[0]
3. U = IN[1]
4. qtotum = IN[2]
5. N = IN[3]
6.
7. outlist = list()
8. i = 0
9. # Вхождение в цикл
10. while i < len(qtothru):
11.     if (qtotum[i] == 0):
12.         P = 0
13.     else:
14.         P = qtothru[i]*U/(qtotum[i]*N*3600)
15.     outlist.append(P)
16.     i = i + 1
17.
18. # Вывод
19. OUT = outlist

```

Рис.10 - Код Python вероятность действия потребителя
 Fig.10 - Python code for consumer action probability

Переменная inputList принимает на себя значения $N \times P$ от α , count Pipe является длинной списка рассчитываемых труб, countKoef – длина списка $N \times P$ от α , NP - $N \times P$ для каждого участка трубопровода. Коэффициент α определяется при помощи интерполяции значений. Код реализации представлен на рис. 11.



```

1. # Ведите подпрограмму Python и загрузите библиотеку DesignScript
2. import sys
3. import clr
4. clr.AddReference('ProtoGeometry')
5. from Autodesk.DesignScript.Geometry import *
6.
7. # Введенные в этом узле данные сохраняются в виде списка в переменных IN.
8. inputList=[N[0]]
9. countPipe=N[1]
10. countKoef=N[2]
11. NP=IN[1]
12.
13. # Разместите код под этой строкой
14. outlist=list()
15. i=0
16. j=0
17.
18. while i < countPipe:
19.     j=0
20.     while j < countKoef:
21.         if (NP[1]>inputList[i][j] and NP[1]<inputList[i][j+1]):
22.             NP1=inputList[i][j]
23.             NP2=inputList[i][j+1]
24.             K1=inputList[i][j+1]
25.             K2=inputList[i][j+2]
26.             itog=K1+(K2-K1)*(NP[1]-NP1)/(NP2-NP1)
27.             outlist.append(itog)
28.         j=j+1
29.     i=i+1
30.
31. # Назначьте вывод переменной OUT.
32. OUT = outlist

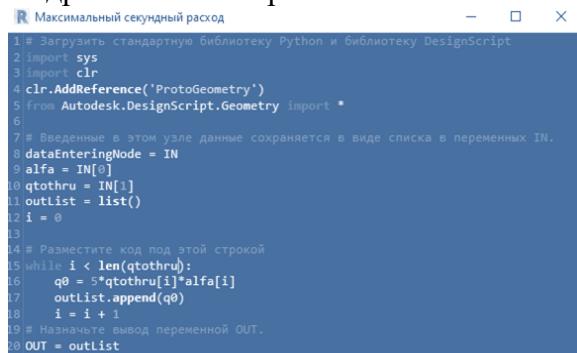
```

Рис. 11 - Код Python коэффициент альфа
 Fig. 11 - Python code alpha coefficient

Для нахождения искомого максимального секундного расхода потребуются: секундный расход прибором $q_{hr,u}^{tot}$ и коэффициент α . Максимальный секундный расход получается по формуле 2. Переменная alfa принимает значение рассчитанного ранее коэффициента α , qtothru - секундный расход прибором. Переменная q0 принимает расчётное максимального расхода и является выходным значением.

$$q = 5 \times q_0^{tot} \times \alpha, \quad (2)$$

где α – коэффициент гидравлического трения



```

1. # Загрузить стандартную библиотеку Python и библиотеку DesignScript
2. import sys
3. import clr
4. clr.AddReference('ProtoGeometry')
5. from Autodesk.DesignScript.Geometry import *
6.
7. # Введенные в этом узле данные сохраняются в виде списка в переменных IN.
8. dataEnteringNode = IN
9. alfa = IN[0]
10. qtothru = IN[1]
11. outlist = list()
12. i = 0
13.
14. # Разместите код под этой строкой
15. while i < len(qtothru):
16.     q0 = 5*qtothru[i]*alfa[i]
17.     outlist.append(q0)
18.     i = i + 1
19. # Назначьте вывод переменной OUT.
20. OUT = outlist

```

Рис. 12 - Код Python максимальный секундный расход
 Fig. 12 - Python code maximum second flow rate

Реализация кода представлена на рис. 12. Нахождение максимального часового расхода q , требует рассчитать вероятность действия потребителей P_{hr} и определить коэффициент α_{hr} от $N \times P_{hr}$. Данные действия представлены на рис. 13.

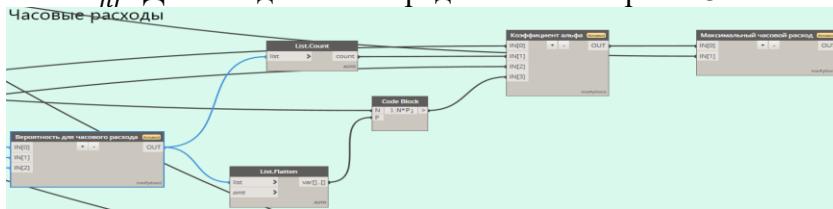


Рис. 13 - Ноды для расчета максимального часового расхода
 Fig. 13 - Nodes for calculating maximum hourly consumption

Вероятность для часового расхода определяется по формуле 3. Для вероятности часового расхода P_{hr} потребуются P_0 , которое принимает значение переменная P_0 , и $q_0^{tot}, q_{0,hr}^{tot}$ для переменных q_0 и $q_{0,tot}$ соответственно. Код реализации представлен на рис. 14.

$$P_{hr} = \frac{3600 \times P_0^{tot} \times q_0}{q_{0,hr}^{tot}}, \quad (3)$$

где $q_{0,hr}^{tot}$ – расход прибором воды общий $\text{м}^3/\text{ч}$.

```

# Вероятность для часового расхода
1# Загрузить стандартные библиотеку Python и библиотеку DesignScript
2import sys
3import clr
4clr.AddReference('ProtoGeometry')
5from Autodesk.DesignScript.Geometry import *
6
7# Введенные в этом узле данные сохраняется в виде списка в переменных IN.
8dataEnteringNode = IN
9P0 = IN[0]
10q0 = IN[1]
11qtot0hr = IN[2]
12outlist = list()
13i = 0
14
15# Разместите код под этой строкой
16while i < len(q0):
17    Phr = 3600*P0[i]*q0[i]/qtot0hr[i]
18    outlist.append(Phr)
19    i = i + 1
20# Назначьте вывод переменной OUT.
21OUT = outlist

```

Рис. 14 - Код Python вероятность действия для часового расхода
 Fig. 14 - Python code for the probability of action for hourly consumption

Переменная `inputList` принимает на себя значения $N \times P_{hr}$ от α_{hr} , `countPipe` является длинной списка рассчитываемых труб, `countKoef` – длина списка $N \times P_{hr}$ от α_{hr} , `NP` – $N \times P_{hr}$ для каждого участка трубопровода. Коэффициент α_{hr} определяется при помощи интерполяции значений. Код реализации представлен на рис. 15.

```

# Включить поддержку Python и загрузить библиотеку DesignScript
1# Загрузить стандартные библиотеку Python и библиотеку DesignScript
2import sys
3clr.AddReference('ProtoGeometry')
4from Autodesk.DesignScript.Geometry import *
5
6# Введенные в этом узле данные сохраняется в виде списка в переменных IN.
7inputList=IN[0]
8countPipe=IN[1]
9countKoef=IN[2]
10NP=IN[3]
11# Разместите код под этой строкой
12outlist=list()
13i=0
14j=0
15
16while i<countPipe:
17    j=0
18    while j<countKoef-1:
19        if((NP[i]>inputList[0][j])and(NP[i]<inputList[0][j+1])):
20            NP1=inputList[0][j]
21            NP2=inputList[0][j+1]
22            K1=inputList[1][j]
23            K2=inputList[1][j+1]
24            itop=K1+(K2-K1)*(NP[i]-NP1)/(NP2-NP1)
25            outlist.append(itop)
26            break
27        j=j+1
28    i=i+1
29# Назначьте вывод переменной OUT.
30OUT = outlist

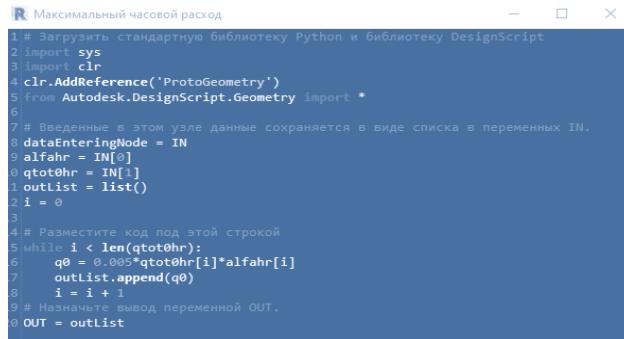
```

Рис. 15 - Код Python Коэффициента альфа для часового расхода
 Fig. 15 - Python Code for Alpha Coefficient for Hourly Flow Rate

Максимальный часовой расход определяется по формуле 4. На часовой расход влияют α_{hr} , которое принимает значение переменная `alfahr`, и часовой расход воды прибором $qtot0hr$ - $q_{0,hr}^{tot}$.

$$q = 0.005 \times q_{0,hr}^{tot} \times \alpha_{hr} \quad (4)$$

Процесс выселения происходит в узле «Максимальный часовой расход», который является переименованным узлом «Python Script» [7]. Реализация кода представлена на рис. 16.



```

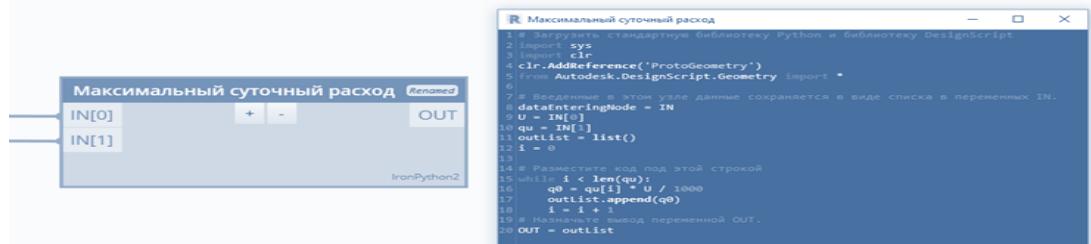
1 # Загрузить стандартную библиотеку Python и библиотеку DesignScript
2 import sys
3 import clr
4 clr.AddReference('ProtoGeometry')
5 from Autodesk.DesignScript.Geometry import *
6
7 # Введенные в этом узле данные сохраняются в виде списка в переменных IN.
8 dataEnteringNode = IN
9 al Fahr = IN[0]
10 qtot0hr = IN[1]
11 outlist = list()
12 i = 0
13
14 # Разместите код под этой строкой
15 while i < len(qtot0hr):
16     q0 = 0.005*qtot0hr[i]*al Fahr[i]
17     outlist.append(q0)
18     i = i + 1
19 # Назначьте вывод переменной OUT.
20 OUT = outlist

```

Рис. 16 - Код Python максимальный часовой расход
 Fig. 16 - Python code for maximum hourly consumption

Максимальный суточный расход определяется по формуле 5. Для расчета максимального суточного расхода потребуются: количество жильцов – U , которое принимает значение переменная U , и среднесуточное потребление $q_{u,m}^{tot}$ – qu . Процесс вычисления максимального суточного расхода продемонстрирован на рис. 17.

$$q = \frac{q_{u,m}^{tot} \times U}{1000} \quad (5)$$



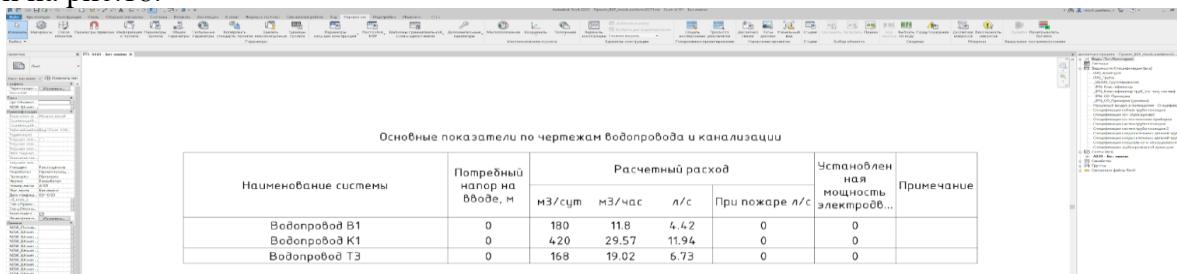
```

1 # Загрузите стандартную библиотеку Python и библиотеку DesignScript
2 import sys
3 import clr
4 clr.AddReference('ProtoGeometry')
5 from Autodesk.DesignScript.Geometry import *
6
7 # Введенные в этом узле данные сохраняются в виде списка в переменных IN.
8 dataEnteringNode = IN
9 U = IN[0]
10 qu = IN[1]
11 outlist = list()
12 i = 0
13
14 # Разместите код под этой строкой
15 while i < len(qu):
16     q0 = qu[i] * U / 1000
17     outlist.append(q0)
18     i = i + 1
19 # Назначьте вывод переменной OUT.
20 OUT = outlist

```

Рис. 17 - Код Python максимальный суточный расход
 Fig. 17 - Python code maximum daily consumption

Результат работы блока скрипта по водопотреблению и водоотведению представлен на рис.18.



Основные показатели по чертежам водопровода и канализации

Наименование системы	Потребный напор на Вводе, м	Расчетный расход			Установленная мощность электроприв...	Примечание
		м3/сум	м3/час	л/с		
Водопровод В1	0	180	11.8	4.42	0	0
Водопровод К1	0	420	29.57	11.94	0	0
Водопровод Т3	0	168	19.02	6.73	0	0

Рис. 18 - Результат расчета блока водопотребления и водоотведения
 Fig. 18 - Result of calculation of the water consumption and water disposal block

Вывод. Вышеупомянутые алгоритмы представляют собой лишь отдельные примеры обширного множества опций, доступных пользователю Dynamo. Реализация этих возможностей позволяет полностью реализовать современный потенциал информационного моделирования. Использование среды разработки Dynamo позволяет создавать эффективные программные модули для автоматизации расчётов водопотребления и водоотведения. Это повышает качество проектирования и сокращает время на выполнение рутинных задач. Осуществление всех вышеупомянутых сценариев требует незначительного количества времени, что подтверждает целесообразность использования Dynamo как эффективного средства автоматизации задач, стоящих перед проектировщиками. Ограничения Dynamo определяются только возможностями самого проектировщика.

Эта среда визуального программирования поддерживает выполнение внутренних узлов, включающих фрагменты кода Python, что открывает широкие возможности её использования. Наличие полной и структурированной базы сценариев позволяет сократить сроки проектирования.

Библиографический список:

1. СП 30.13330-2020. «Внутренний водопровод и канализация»
2. Т.А. Юрошева, А.В. Калинченко, В.Г. Макиев. Алгоритм проектирования несущих конструкций многоэтажного здания с использованием среды визуального программирования DYNAMO STUDIO. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022; 49(4):126-133. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-4-126-133
3. Смакаев Р.М., Низина Т.А. Автоматизация задач проектирования с помощью среды визуального программирования DYNAMO STUDIO [Электронный ресурс] // Огарев-online. - 2020. - №3.
4. Калинченко А.В. О расширении функциональности системы autocad на примере автоматизации проектирования водоснабжения жилых зданий. Наука и бизнес:пути развития. 2016. №6(60)-С.12-15.
5. Поддорогина Е.А., Шумилов К.А., Мазинг А.А. Разработка строительных объектов в DYNAMO REVIT // BIM- моделирование в задачах строительства и архитектуры: материалы Всерос. науч.-практ. конф., 29-30 марта 2018 г. – СПб: СПбГАСУ, 2018. – С. 177–182.
6. Поддорогина Е.А., Шумилов К.А., Мазинг А.А. Разработка строительных объектов в DYNAMO REVIT // BIM- моделирование в задачах строительства и архитектуры: материалы Всерос. науч.-практ. конф., 29-30 марта 2018 г. – СПб: СПбГАСУ, 2018 – С. 177–182.
7. Официальный сайт поддержки продукта Dynamo Studio [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.dynamoprimer.com/index.html>

References:

1. SP 30.13330-2020. "Internal water supply and sewerage"
2. T.A. Yurosheva, A.V. Kalinichenko, V.G. Makiev. An algorithm for designing load-bearing structures of a multi-storey building using the DYNAMO STUDIO visual programming environment. *Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Sciences*. 2022; 49(4):126-133. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-4-126-133 (In Russ)
3. Smakaev R.M., Nizina T.A. Automation of design tasks using DYNAMO STUDIO visual programming [Electronic resource] Ogarev-online. 2020; 3. (In Russ)
4. Kalinichenko A.V. On expanding the functionality of the autocad system using the automation of the design of water supply for residential buildings Science and business: development path. 2016;6(60):12-15. (In Russ)
5. Poddorogina E. A., Shumilov K. A., Mazing A. A. Development of construction objects in DYNAMO REVIT. BIM-modeling in construction tasks and architecture: materials of All-Russian Scientific and Practical Conference, March 29-30, 2018 St. Petersburg: SPbGA-SU, 2018; 177-182. (In Russ)
6. Poddorogina E. A., Shumilov K. A., Mazing A. A. Development of construction objects in DYNAMO REVIT. BIM-modeling in construction tasks and architecture: materials of All-Russian Scientific and Practical Conference, March 29-30, 2018 – St. Petersburg: SPbGA-SU, 2018; 177-182. (In Russ)
7. Official website of Dynamo Studio product support [El.res.]. Access mode: <https://www.dynamoprimer.com/index.html>

Сведения об авторах:

Юрошева Татьяна Александровна, кандидат технических наук, доцент; trini-83@yandex.ru; ORCID: 0009-0002-1365-8787

Калинченко Алла Викторовна, кандидат технических наук, доцент; kalinichenkoalla@mail.ru; ORCID: 0000-0003-0515-8184

Information about authors:

Tatiana A. Yurosheva, Cand.Sci.(Eng), Assoc. Prof.; trini-83@yandex.ru; ORCID 0009-0002-1365-8787
Alla V. Kalinichenko, Cand.Sci.(Eng), Assoc.Prof.; kalinichenkoalla@mail.ru; ORCID 0000-0003-0515-8184

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 25.10.2024.

Одобрена после рецензирования/Revised 30.11.2024.

Принята в печать/Accepted for publication 12.01.2025.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 004.052



DOI: 10.21822/2073-6185-2025-52-1-183-192 Оригинальная статья /Original article

**Влияние системы «человек-машина-среда» на надежность
автоматизированных систем ОВД Российской Федерации**

А.И. Янгиров¹, И.М. Янгиров¹, И.Г. Дровникова², В.Р. Романова², П.М. Дуплякин²

¹ФКУ «НИЦ «Охрана» Росгвардии,

¹111539, г. Москва, Реутовская, 12Б, Россия,

²Воронежский институт МВД России,

²394065, г. Воронеж, проспект Патриотов, 53, Россия

Резюме. Цель. В статье рассмотрено влияние системы «человек-машина-среда» (ЧМС) на надежность автоматизированных систем (АС) органов внутренних дел Российской Федерации (ОВД РФ). **Метод.** Исследование проведено на основе анализа возможных человеческих и технических факторов, а также факторов окружающей среды, влияющих на надежность АС, различных источников научной литературы и публикаций.

Результат. Доказана важность системы «ЧМС» при расчете надежности АС ОВД РФ, отражены основные факторы, влияющие на надежность АС. Предложен вариант расчета вероятности правильного и своевременного выполнения задачи оператором. **Вывод.** Результаты расчетов демонстрируют, что замена даже одного элемента позволяет повысить общую надежность автоматизированной системы. На примере рассмотренной СКУД общая надежность автоматизированной системы увеличилась на 18%.

Ключевые слова: надежность, автоматизированная система, факторы надежности, факторы среды, «человек-машина-среда»

Для цитирования: А.И. Янгиров, И.М. Янгиров, И.Г. Дровникова, В.Р. Романова, П.М. Дуплякин. Влияние системы «человек-машина-среда» на надежность автоматизированных систем ОВД Российской Федерации. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025; 52(1):183-192. DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-1-183-192

**Influence of the human-machine-environment system on reliability automated systems IAB
of the Russian Federation**

A.I. Yangirov¹, I.M. Yangirov¹, I.G. Drovnikova², V.R. Romanova², P.M. Duplyakin²

¹FKU "Research Center "Protection" of the Russian Guard,

¹12B Reutovskaya St., Moscow 111539, Russia,

²Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia,

²53 Patriotov Ave., Voronezh 394065, Russia

Abstract. Objective. The article examines the influence of the “man-machine-environment” system on the reliability of automated systems of internal affairs bodies of the Russian Federation. **Method.** The study was conducted based on an analysis of possible human and technical factors, as well as environmental factors affecting the reliability of automated systems, various sources of scientific literature and publications. **Result.** The result of the automated system for calculating the security index of the analyzed open OS is one of the specified criteria for the degree of security of the OS, based on the provisions of fuzzy logic. **Conclusion.** The calculation results demonstrate that replacing even one element allows increasing the overall reliability of the automated system. In the example of the considered ACS, the overall reliability of the automated system increased by 18%.

Keywords: security assessment, security requirements, data bank of information security threats, security indicator, security criteria, operating system, automated calculation system

For citation: A.I. Yangirov, I.M. Yangirov, I.G. Drovnikova, V.R. Romanova, P.M. Duplyakin. Influence of the human-machine-environment system on reliability automated systems IAB of the Russian Federation. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2025; 52(1):183-192. (In Russ) DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-1-183-192.

Введение. С необходимостью вычисления надёжности технических устройств и систем столкнулось человечество с момента их внедрения. К примеру, в начале XX века возникла потребность в заправке газовых фонарей. Чтобы вычислить время их заправки требовались знания среднего времени горения. Позднее методику вычисления среднего времени работы электронной лампы разработал шведский учёный В. Вейбулл. В дальнейшем она стала более известна как распределение Вейбулла [1].

Одними из первых советских исследований в области оценки надёжности стали работы профессора В.И. Сифорова и инженера Б.М. Якуба. В исследованиях расчет надежности систем определялся как произведение надёжности отдельных элементов с последовательным соединением компонентов [2].

С развитием технологий одной из важных задач становится оценка надежности АС. Это обусловлено ростом требований к сложности продукции и ее качеству. В результате сбоев или отказа техники, а также различных устройств и приборов в неподходящий момент могут возникнуть самые серьёзные последствия, включая возможную гибель людей, что не может оправдываться никакими экономическими показателями. Поэтому первоочередными задачами для производителей в последнее время становится уменьшение затрат на обслуживание технических средств, их ремонт, продление срока службы выпускаемой продукции и повышение ее надёжности.

Постановка задачи. В ОВД для АС различного назначения надежность также является одним из важных критериев. АС в ОВД отвечают за управление различными процессами в области безопасности, поэтому их работа должна быть максимально надежной и безотказной. Поэтому исследования в данной области для ОВД РФ имеют большое практическое значение. Одним из направлений в области обеспечения надежности является исследование влияния системы «человек-машина-среда» (Далее – «ЧМС»).

В настоящее время исследования в данном направлении достаточно актуальны, поскольку учет взаимодействия между человеком, техникой и окружающей средой важен для повышения безопасности, надежности и эффективности современных высокотехнологичных АС во многих ключевых отраслях.

Методы исследования. Данное исследование основано на анализе широкого круга факторов системы «ЧМС», влияющих на надежность АС, включая человеческие, технические и факторы окружающей среды, а также различных источников научной литературы и публикаций [3-8]. Вопросы влияния системы «ЧМС» на надежность ранее рассматривались в таких исследованиях как [3-5]. Применение АС с высокими показателями надежности в ОВД позволяет:

1. Обеспечивать непрерывную работу и отслеживание всех происходящих событий, что способствует оперативному реагированию на возможные угрозы и предотвращению различных инцидентов [6];

2. Оперативно анализировать информацию и принимать решения – это способствует оптимизации работы сотрудников и повысить общую эффективность работы ОВД;

3. Обеспечить доверие к АС, тогда пользователи, могут быть уверены, что система не подведет их в критических ситуациях и будет работать стабильно;

4. Сократить время на обработку информации и уменьшить нагрузку на сотрудников, что способствует экономии ресурсов и повышению производительности.

Надежность АС и ее элементов является важным свойством, определяющим качество тех операций, для которых эти АС предназначены. Рост количества технических и технологических отказов приводит к снижению надежности систем.

Часто это возникает в связи с нарушением согласованности между отдельными составляющими системы «человек-машина-среда» (далее – «ЧМС»). Машины управляются и обслуживаются человеком-оператором, и поэтому оператор рассматривается как важный компонент, от которого зависит надежность всей системы «ЧМС» [3]. Современные АС характеризуются требовательностью как к оборудованию и технологий, так и к человеку, который является элементом системы «ЧМС». Но человек – самый важный элемент системы! Схематичное изображение системы «ЧМС» представлено на рис. 1.

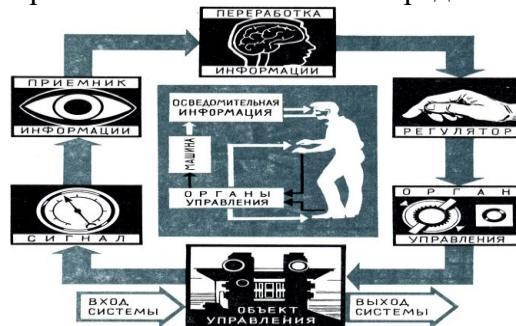


Рис. 1 – Схематичное изображение системы «ЧМС»

Fig. 1 – Schematic representation of the “ChMS” system

Однако возможности человека, особенно психофизиологические, с каждым годом ухудшаются. То есть возникает четкая негативная тенденция, определяющая кризис между технологическими процессами и оборудованием, которые совершенствуются с каждым годом, и психофизиологическими и физическими возможностями человека, который является непосредственным участником этих процессов.

Негативная тенденция с ухудшением возможностей человека определяет количество несчастных случаев при работе с АС. Психофизиологические особенности каждого человека индивидуальны, это должны учитывать руководители разных уровней. Оптимизация процесса труда – это сложная комплексная задача, которую помогает решать эргономика. С ее помощью можно оптимизировать условия и процесс труда.

Эффективность функционирования системы «ЧМС» зависит от эффективности работы как технических звеньев, так и человека (оператора), который оценивается по показателям надежности и эргономичности, а также риска возникновения опасных ситуаций. Надежная работа системы «ЧМС» в целом зависит от надежной работы АС и надежной работы человека (оператора). Такая составляющая как «оператор» является центральным звеном в обеспечении работоспособности системы «ЧМС». Именно человек в технологической системе выполняет трудовую деятельность по эксплуатации АС, техническому обслуживанию или ремонту средств АС. Техника управляется и обслуживается человеком-оператором, а потому она рассматривается как одно из важных звеньев, от надежности которого зависит надежность сложной системы «ЧМС».

Надежность оператора определяется как вероятность качественного исполнения работы или решения поставленной задачи в течение установленного срока при заданных условиях. Надежность человеческой деятельности в системе «ЧМС» заключается в надежности выполнения человеком функций по управлению АС и их обслуживанию. Надежность оператора, как правило, представляется в виде структурной и функциональной надежности. Структурная надежность представляет собой способность человека сохранять свою работоспособность на протяжении определенного времени в заданных условиях. Функциональная надежность – это способность человека выполнять конкретные функции в соответствии с поставленной задачей в тех же временных и условных рамках.

На безопасность функционирования системы «ЧМС» больше всего влияет функциональная надежность. Поэтому надежность оператора характеризуется показателями безошибочности, готовности, возобновляемости, своевременности. Как и для технических средств, главным параметром безошибочности АС является вероятность ее правильной

работы. На уровне всего алгоритма (задачи целиком), а также на уровне каждой отдельной операции должна предусматриваться вероятность правильной работы.

Для уровней отдельной операции основными критериями являются вероятность безошибочного выполнения операции, а для типичных операций, которые чаще всего повторяются, – интенсивность ошибок (отказов).

Ошибка оператора понимают как неправильное выполнение или невыполнение оператором соответствующих действий. Это может быть причиной повреждения оборудования или нарушения нормального выполнения запланированной операции. Все ошибки оператора разделяют на закономерные и случайные. Ошибки, совершенные по причинам, которые возможно выявить, проанализировать и ликвидировать, относятся к закономерным. Ошибки, причины которых случайны и неизвестны, имеют стохастический характер.

По природе возникновения различают три вида ошибок оператора:

- сенсорные, связанные с неверным восприятием информации, что может зависеть от эмоционального состояния человека или его усталости [4];
- логические (ошибки в принятых решениях), связанные с нехваткой информации, дефицитом времени и состоянием человека;
- моторные, связанные с выполнением управляющих действий, ограниченностью времени, неоптимальной энергетической совместимостью (то есть согласование системы управления автоматизированной системы с возможностями человека относительно приложенных усилий).

Следовательно, оператор является существенным источником рисков для надежности АС, поскольку выполняет в системе основную функцию. Надежность оператора зависит от многих факторов объективного и субъективного характера.

Субъективные факторы зависят от состояния оператора, его индивидуальных свойств, морально-психологических качеств, медико-биологических показателей, а также уровня подготовки к этому виду деятельности. Они должны учитываться при организации деятельности оператора, что обеспечивает безопасность функционирования системы «ЧМС».

Индивидуальные особенности оператора определяются общим состоянием его здоровья, состоянием нервной системы, психофизиологическими свойствами. От индивидуальных особенностей человека зависит способность человека к обучению и тренировке. Они являются основой профессионального отбора. Индивидуальные особенности оператора определяют на основании: устойчивости к эмоциональным потрясениям; способности восстанавливаться во время отдыха; стойкости к внешнему, внутреннему противодействию (помехе); изворотливости, ловкости, способности своевременно менять стратегию действий; безошибочности; работоспособности; выносливости и готовности к авральному режиму работы; множественности приемов и способов работы; скорости принятия и исполнения решения и тому подобное.

Значительное место среди психических процессов, влияющих на качество работы оператора, занимает внимание. Оно характеризуется появлением выборочной готовности мозга к соответствующим реакциям на определенные сигналы. При этом происходит повышение чувствительности анализаторов и уменьшение латентного периода до ожидаемых сигналов, повышение готовности исполнительного аппарата для этих сигналов. От внимания зависит уровень настроенности человека к восприятию и переработке информации. Объективные факторы делятся на две группы: эргономические и факторы окружающей среды. Эргономические факторы надежности оператора включают гигиенические, антропометрические, физиологические, психофизиологические, психологические факторы. Эргономические факторы показывают совместимость человека и других элементов в системе «ЧМС».

К факторам среды относятся факторы условий труда и факторы трудового процесса. На условия труда влияет совокупность факторов производственной среды. Неблагоприятные

приятные условия труда негативно влияют на здоровье и работоспособность человека. Регламентируют условия труда санитарные нормы. Особенности трудового процесса определяют психофизиологические факторы. К ним относятся тяжесть и напряженность труда. Тяжесть труда является количественной характеристикой физического труда. Напряженность – количественная характеристика умственного труда. В сфере совместимости человека с другими элементами системы выявляют 5 видов: энергетическая, биофизическая, информационная, технико-эстетическая и пространственно-антропометрическая.

Энергетическая совместимость представляет собой отношение возможностей человека к механизмам управления, приложенных усилий к затрачиваемой мощности, скорости и точности движений человека к скорости выполняемой задачи машиной. Биофизическая совместимость – это, прежде всего, необходимость в местоположении, в отсутствии внешних факторов раздражения, в среде, во взаимодействии человека с машиной. Нормальная работоспособность обеспечивается нормальным физиологическим состоянием человека. Информационная совместимость – это информационное взаимодействие, при котором человеком (оператором) безошибочно обрабатывается принимаемая информация, при этом не затрачивается особых усилий на концентрацию внимания и память, отображаются все нужные состояния «машины», ее работоспособность (перегрев, слабый сигнал, и тому подобное). Пространственно-антропометрическая совместимость включает в себя пространственное положение человека в процессе его работы (сидя, полулежа, в невесомости), возможность обзора, размеры частей тела человека (способность дотянуться). Технико-эстетическая совместимость – обеспечение удовольствия человека от работы с машиной в процессе труда.

Исследование влияния объективных факторов на человека в системе «ЧМС» является целью создания для работника оптимальных условий труда, что способствует повышению надежности работы. Для исследования надежности работы человека нужно выделить несколько основных типов систем, в которых главную роль выполняет человек-оператор. Все эксплуатируемые системы могут быть в трех основных режимах: «ожидание» (система не функционирует), «подготовка» (подготовка к работе) и «функционирование».

Есть типы систем, для которых свойственны один, два или все три режима одновременно. Надежность работы человека-оператора рассматривается в системе, которая работает в трех режимах, оператор устраняет отказы во всех режимах, всегда готов к работе, активно работает, но может допускать ошибки в управлении, то есть при безотказности системы могут возникать отклонения от заданной программы действий.

Вероятность правильного выполнения задачи будет зависеть как от безотказной работы оборудования, так и от ошибок оператора, а также от возможности устранения этих ошибок. Для систем «ЧМС» непрерывного типа показателем надежности является вероятность безотказного, безошибочного и своевременного протекания производственного процесса в течение времени t :

$$P_{\text{чм1}}(t) = P_{\text{т}}(t) + [1 - P_{\text{т}}(t)] \cdot K_{\text{оп}} [P_{\text{оп}} \cdot P_{\text{св}} + (1 - P_{\text{оп}})P_{\text{исп}}(t)]$$

где: $P_{\text{т}}$ – вероятность безотказной работы технических средств;

$K_{\text{оп}}$ – коэффициент готовности оператора;

$P_{\text{оп}}$ – требуемая надежность оператора;

$P_{\text{св}}$ – вероятность своевременного выполнения оператором требуемых действий;

$P_{\text{исп}}$ – вероятность исправления ошибочных действий.

Для систем «ЧМС» дискретного типа:

$$P_{\text{чм2}}(t) = K_{\text{г}} P_{\text{т}} P_{\text{пр}} P_{\text{св}} + (1 - P_{\text{т}}) K_{\text{г}} P_{\text{вос}} P_{\text{пр}} P_{\text{св}} + (1 - P_{\text{пр}}) P_{\text{исп}} P_{\text{т}}$$

где: $K_{\text{г}}$ – коэффициент готовности техники;

$P_{\text{пр}}$ – среднее значение вероятности безошибочной работы оператора;

$P_{\text{вос}}$ – вероятность восстановления отказавшей техники.

Критерий оценки деятельности оператора. Человек как звено «ЧМС» характеризуется быстродействием, надежностью, точностью работы, напряженностью своей деятельности.

ности. Показатель быстродействия – это количественная характеристика, отражающая скорость выполнения задачи или операции техническим устройством или системой. Этот показатель обычно измеряется в единицах времени и является важным критерием оценки эффективности работы устройства или системы.

Надежность работы оператора характеризуется вероятностью правильного выполнения задачи. Точность работы оператора является важным аспектом его деятельности. Надежность и точность оценивают различные аспекты работы оператора, представляя собой отдельные характеристики. Точность работы оператора – это количественный или качественный показатель способности оператора выполнять задачи или операции с минимальным уровнем ошибок или неточностей. Эта характеристика может измеряться различными способами, включая процентное соотношение правильно выполненных операций к общему числу операций или степень соответствия выполненных действий требованиям и стандартам. Количественно точность выражается через погрешность, с которой оператор выполняет измерения, установки или регулировки параметра.

Погрешность отличается от ошибки: если она находится в допустимых пределах, то не считается ошибкой. Только при превышении этих пределов погрешность становится ошибкой, которая может повлиять на надежность работы системы.

В работе оператора стоит различать постоянную и переменную погрешности. Борьба с постоянными погрешностями не вызывает особых трудностей. Ее влияние можно нейтрализовать соответствующей калибровкой, применением методов компенсации, устранением причин, вызывающих погрешность. Борьба с переменными погрешностями представляет собой более сложную задачу. Основным способом здесь является повышение стабильности деятельности оператора и работы машин.

Специфической характеристикой оператора, не имеющего аналогов для машинных звеньев, является напряженность его деятельности, которая может быть двух видов – эмоциональная и операционная. Эмоциональная напряженность зависит от психофизиологических факторов конкретного индивида, данный показатель сложно оценить, поэтому целесообразно сосредоточить усилия на оценке постоянных факторов, влияющих на надежность.

Причиной операционной напряженности является информационная перегрузка, поэтому степень этой напряженности целесообразно оценивать общей вероятностью возникновения перегрузки, а также вероятностями перегрузки за счет каждого из факторов в отдельности. Структурные методы играют важную роль при оценке надежности в процессе проектирования объектов, которые могут быть разделены на составные элементы с установленными или определяемыми методами параметров надежности.

Вероятность безотказной работы при последовательном соединении системы равна произведению вероятностей безотказной работы элементов:

$$P_s = \prod_{i=1}^N p_i,$$

При параллельном соединении N надежных элементов в логической схеме функция надежности участка вычисляется согласно формуле:

$$P_p = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - p_i).$$

Обсуждение результатов. Расчет надежности представленной системы проводился в программном обеспечении «Mathcad 15». Для расчета надежности взяты примерные показатели надежности различных элементов из сети Интернет и различных справочников. Сначала следует определить значения вероятности безотказной работы каждого отдельного элемента аппаратной части системы. Перед тем как составить формулу для вычисления вероятности безотказной работы (БР) всей системы, необходимо выполнить расчеты для участков с параллельным соединением (рис. 2):

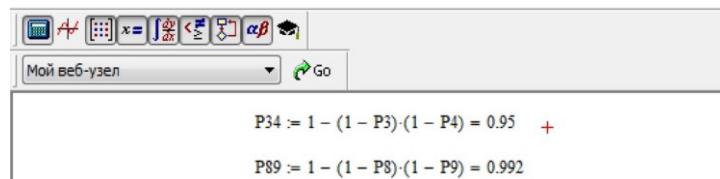


Рис. 2 - Вероятность БР аппаратной части на парных участках системы

Fig. 2 - Probability of hardware failure in paired sections of the system

На основании вычислений мы формируем структуру с последовательно подключенными элементами [P1, P2, P34, P5, P6, P7, P89].

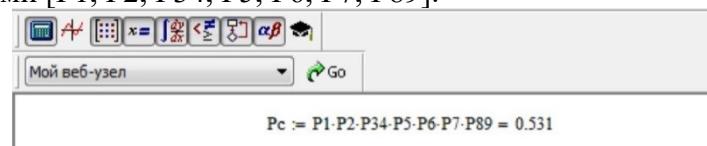


Рис. 3 - Результат расчета всей аппаратной части системы

Fig. 3 - Result of calculation of the entire hardware part of the system

На практике иногда предпочтительнее использовать характеристику вероятности отказа системы Q_c . Вероятность отказа определяется как вероятность возникновения хотя бы одного отказа в заданном временном интервале при определенных условиях эксплуатации (рис. 4).

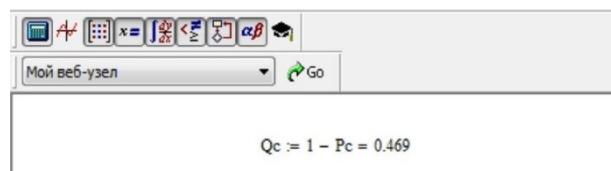


Рис. 4 - Вероятность отказа аппаратной части системы

Fig. 4 - Probability of failure of the system hardware

Для выражения вероятностей безотказной работы и отказа системы в процентном соотношении мы умножим полученные значения на 100% (рис. 5).

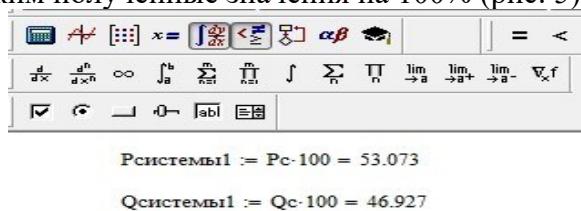


Рис. 5 - Расчеты надежности аппаратной части системы

Fig. 5 - Calculations of the reliability of the system hardware

Таким образом, вероятность безотказной работы аппаратной части представленной автоматизированной системы составляет 53%, а вероятность отказа системы составляет около 47%. Далее следует определить значения вероятности безотказной работы программной части каждого элемента системы в отдельности, а также, провести вычисления для участков с параллельным соединением. После получения всех необходимых данных, необходимо осуществить расчет вероятности безотказной работы всей системы (рис. 6).

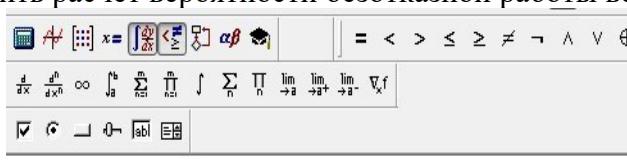


Рис. 6 - Результат расчета всей системы

Fig. 6 - Result of calculation of the entire system

После расчёта вероятности отказа системы, $Q_c = 0,447$

Полученные результаты расчета вероятности безотказной работы и отказа системы переведем в процентное обозначение вероятностей (рис. 7).

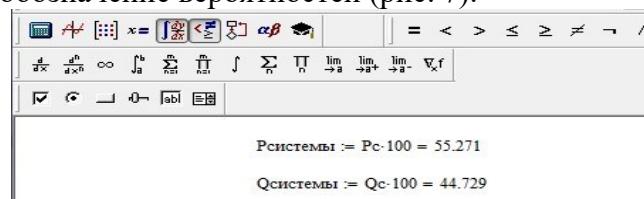


Рис. 7 - Расчеты надежности программной части системы
Fig. 7 - Calculations of the reliability of the software part of the system

Таким образом, вероятность безотказной работы программной части представленной автоматизированной системы составляет 55%, а вероятность отказа системы составляет около 45%. Рассчитаем среднюю вероятность безотказной работы всей АС, которая будет равна 54%, а вероятность отказа составляет около 46%.

Полученная общая надежность автоматизированной системы достаточно низкая. К факторам, влияющим на надежность, могут относиться: сложная структура монтажа и установки, ограничения в передаче данных, внешние воздействия. Повышение надежности программного обеспечения автоматизированной системы возможно только производителем СКУД. Для улучшения надежностных характеристик автоматизированной системы возможно произвести замену кабеля структурированной кабельной сети на более надежный. Необходимо заменить кабель на волоконно-оптический кабель и рассчитать значения безотказной работы каждого элемента системы в отдельности с учетом замененного элемента. Далее, следует повторно провести расчеты с замененным кабелем для оценки влияния волоконно-оптического кабеля на общую надежность СКУД и сравнить вероятность безотказной работы и вероятность отказа аппаратной части системы после замены элемента (рис. 8).

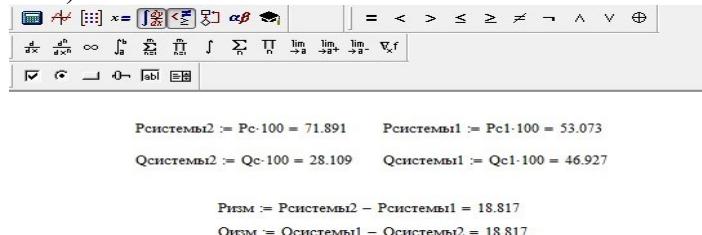


Рис. 8 - Изменения вероятностей безотказной работы и вероятность отказа системы аппаратной части после и до улучшения кабеля
Fig. 8 - Changes in the probabilities of no-failure operation and the probability of failure of the hardware system after and before cable improvement

Расчеты демонстрируют, что вероятность безотказной работы повысилась на 18%, соответственно возросла и общая надежность автоматизированной системы. Надежность отдельного элемента может значительно повлиять на общую надежность всей АС. Так как надежность программного обеспечения может быть повышена только производителем, повышение надежности автоматизированной системы возможно осуществлением замены какого-либо элемента системы, в данном случае, была произведена замена витой пары на оптоволоконный кабель. Результаты расчетов демонстрируют, что замена даже одного элемента позволяет повысить общую надежность автоматизированной системы.

На примере рассмотренной СКУД общая надежность автоматизированной системы увеличилась на 18%. При необходимости улучшить надежностные характеристики автоматизированной системы потребуется заменить любой другой элемент СКУД на более надежный.

Таким образом, влияние системы «ЧМС» на АС достаточно значительно. Человек (оператор) может вносить значительную долю ненадежности в работу АС из-за своих ин-

индивидуальных особенностей (физиологических, психологических, профессиональных и тому подобного).

Ошибки оператора, связанные с неверным восприятием информации, принятием неправильных решений, невыполнением необходимых действий, могут приводить к отказам и аварийным ситуациям в системе. Параметры окружающей среды (температура, влажность, вибрация, электромагнитные помехи и прочее) могут оказывать существенное воздействие на надежность АС и ее элементов. Неблагоприятные внешние условия могут вызывать отказы оборудования, нарушение работы человека (оператора), что в итоге снижает общую надежность системы.

Однако несмотря на важность учета влияния системы «человек-машина-среда», при расчете надежности АС данную среду обычно не принимают во внимание. Это связано с большой индивидуальностью и сложностью моделирования поведения человека (оператора), а также с трудностями в количественной оценке влияния внешних факторов среды. Расчет надежности, как правило, осуществляется только по отношению к технической части АС без учета «человеческого фактора» и условий эксплуатации. Таким образом, исследование влияния системы «человек-машина-среда» на надежность АС ОВД РФ является одним из перспективных направлений научной деятельности.

Надежность АС в значительной степени зависит от взаимодействия человека, машины и окружающей среды. Изучение этого взаимодействия позволит лучше понять и предсказывать возникновение отказов, связанных с ошибками оператора или неблагоприятными условиями среды.

Вывод. Результаты исследования системы «ЧМС» помогут оптимизировать интерфейсы между человеком и машиной, улучшить процессы обучения персонала. Это позволит повысить надежность, безопасность и эффективность функционирования АС. Система «ЧМС» применима в различных сферах, таких как авиация, энергетика, промышленность, транспорт. Исследования в этом направлении имеют высокую практическую значимость для многих отраслей.

Изучение системы «ЧМС» требует объединения знаний из таких областей, как ergonomika, psychology, инженерия, информатика. Это делает данное направление интересным и перспективным с точки зрения развития междисциплинарного научного подхода.

В целом, исследование влияния системы «ЧМС» на надежность АС ОВД РФ является актуальным и многообещающим направлением, способным внести значительный вклад в повышение безопасности и эффективности современных технических систем.

Библиографический список:

1. Распределение Вейбулла: история и современность / С.Я. Гродзенский // Нелинейный мир. – 2023. – Т. 21, № 3. – С. 54-65. – DOI: 10.18127/j20700970-202303-06. – EDN HNVPDQ.
2. Анализ структурных схем с помощью сигнатур. Вычисление сигнатурой сложной структуры / В.А. Чепурко, А.Н. Черняев//Надежность.– 2022. – Т. 22, № 2. – С. 10-21. – DOI: 10.21683/1729-2646-2022-22-2-10-21. – EDN HCFFFB.
3. Оптимизация системы "человек-машина-среда": оценка надежности человека-оператора / В.И. Швецова//Системы контроля окружающей среды. – 2021. – № 1(43). – С. 147-153. – DOI: 10.33075/2220-5861-2021-1-147-153. – EDN NQYFBT.
4. Анализ человеко-машинных систем по воздействию факторов на безопасность и работоспособность оператора/А.А.Кузнецов//Проблемы энергообеспечения, информатизации и автоматизации, безопасности и природопользования в АПК: Международная научно-техническая конференция, Брянск, 12–14 сентября 2012 года. Брянск: Изд. Брянской ГСХА, 2012. – С. 69-78. – EDN TVZJAZ.
5. Психология труда: Учебное пособие для бакалавров / В.А. Шамис, Г.Г. Левкин. – Москва: Ай Пи Ар Медиа, 2023. – 130 с. – ISBN 978-5-4497-1828-0. – EDN SJLZO.
6. К вопросу использования новой информационной технологии, связанной с дополнительной аутентификацией субъектов доступа по клавиатурному почерку, в системах защиты информации от несанкционированного доступа на объектах информатизации органов внутренних дел / А.В. Бацких, И.Г. Дровникова, Е.А. Рогозин // Вестник Воронежского института МВД России. – 2020. – № 2. – С. 21-33. – EDN DDVYPU.

7. Д.И. Лобач. О некоторых проблемах анализа и оценки влияния человеческого фактора на безопасность технических систем. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2024;51(2):91-100. DOI: 10.21822/2073-6185-2024-51-2-91-100
8. О.И. Бокова, С.В. Канавин, Н.С. Хохлов, И.В. Гилев, Л.А. Лекарь. К вопросу обеспечения защищенного доступа к информационным системам с применением биометрической аутентификации на основе нечеткого образа личности пользователя и нейросетевых преобразований. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023; 50(4):75-84. DOI: 10.21822/2073-6185-2023-50-4-75-84

References:

1. Weibull distribution: history and modernity. S.Ya. Grodzensky. *Nonlinear world*. 2023; 21(3):54-65. – DOI: 10.18127/j20700970-202303-06. – EDN HNVPDQ. (In Russ)
2. Analysis of structural diagrams using signatures. Calculation of the signature of a complex structure. V.A. Chepurko, A.N. Chernyaev. *Reliability*. 2022;22(2):10-21. – DOI: 10.21683/1729-2646-2022-22-2-10-21. – EDN HCFFFB. (In Russ)
3. Optimization of the man-machine-environment system: assessment of the reliability of the human operator. V.I. Shvetsova. *Environmental control systems*. 2021;1(43):147-153. – DOI: 10.33075/2220-5861-2021-1-147-153. – EDN NQYFBT. (In Russ)
4. Analysis of human-machine systems based on the impact of factors on operator safety and performance / A.A. Kuznetsov. Problems of energy supply, information and automation, safety and environmental management in the agro-industrial complex: International scientific and technical conference, Bryansk, September 12–14, 2012. Bryansk: Publishing house of the Bryansk State Agricultural Academy, 2012; 69-78. – EDN TVZJAZ. (In Russ)
5. Labor psychology: Textbook for bachelors. V.A. Shamis, G.G. Levkin. Moscow: IP Ar Media, 2023:130. – ISBN 978-5-4497-1828-0. – EDN SJLLZO. (In Russ)
6. On the issue of using new information technology related with additional authentication of access subjects using keyboard handwriting, in systems for protecting information from unauthorized access at information facilities of internal affairs bodies. A.V. Batskikh, I.G. Drovnikova, E.A. Rogozin. *Bulletin of the Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia*. 2020; 2: 21-33. – EDN DDVYPU. (In Russ)
7. D.I. Lobach. On some problems of analysis and assessment of the influence of the human factor on the safety of technical systems. *Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences*. 2024;51(2):91-100. DOI: 10.21822/2073-6185-2024-51-2-91-100 (In Russ)
8. O.I. Bokova, S.V. Kanavin, N.S. Khokhlov, I.V. Gilev, L.A. Lekar. On the issue of ensuring secure access to information systems using biometric authentication based on a fuzzy image of the user's identity and neural network transformations. *Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences*. 2023; 50(4):75-84. DOI: 10.21822/2073-6185-2023-50-4-75-84 (In Russ)

Сведения об авторах:

Янгиев Адиль Илдарович, начальник отделения лабораторных исследований и испытаний; adil-yan@yandex.ru

Янгиев Илдар Мухаматович, научный сотрудник отдела развития средств обнаружений; YIMufa@yandex.ru

Романова Виктория Романовна, адъюнкт; romanovna_vika@inbox.ru

Дровникова Ирина Григорьевна, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры автоматизированных информационных систем органов внутренних дел; idrovnikova@mail.ru

Дуплякин Петр Михайлович, преподаватель кафедры радиотехнических систем и комплексов охранного мониторинга, 00008540@mail.ru

Information about authors:

Adil I. Yangirov, Head of the Laboratory Research and Testing; adil-yan@yandex.ru

Ilidar M. Yangirov, Researcher at the Department of Development of Detection Tools; YIMufa@yandex.ru

Victoria R. Romanova, Adjunct; romanovna_vika@inbox.ru

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

Pyotr M. Duplyakin, Lecturer, Department of Radio Engineering Systems and Security Monitoring Complexes; 00008540@mail.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 20.10.2024.

Одобрена после рецензирования/Revised 29.11.2024.

Принята в печать/Accepted for publication 12.01.2025.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 624.04



DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-1-193-201 Оригинальная статья /Original article

**Моделирование каркаса уникального здания параметрической архитектуры
на основе применения поверхности «цилиндр-цилиндр»**

Э.К. Агаханов¹, М.К. Агаханов², Е.В. Труфанова³, А.З. Джабраилов¹

¹ Дагестанский государственный технический университет,

¹ 367015, г. Махачкала, пр. Имама Шамиля, 70, Россия,

² Национальный исследовательский Московский государственный строительный
университет (НИУ МГСУ),

² 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26, Россия,

³ Донской государственный технический университет,

³ 344002, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1, Россия

Резюме. Цель. В статье рассмотрено информационное моделирование каркаса уникального здания параметрической формы в программных комплексах САПФИР и Лира-САПР. **Метод.** На первом этапе рассмотрено формообразование ротативной поверхности с аксоидами «Цилиндр-цилиндр», образованной прямой, пересекающей ось подвижного цилиндра при наружном обкатывании. Варьирование параметров позволило получить ряд поверхностей, пригодных для создания параметрической формы каркаса уникального здания. Для дальнейшей работы принята поверхность с пятью выпуклыми частями. Обтекаемые формы объекта позволяют оптимизировать ветровые потоки, защищают от образования снежных мешков, что является актуальным. **Результат.** Проведен модальный анализ для первого варианта моделирования системы. Выполнен расчет по деформациям на действие постоянных, временных длительных и кратковременных нагрузок. Проведено сравнение прогибов, горизонтальных перемещений и ускорений этажей с предельно допустимыми значениями. **Вывод.** Результаты исследования позволяют выбрать оптимальный вариант аналитической ротативной поверхности. Выполнен расчет по деформациям на действие постоянных, временных длительных и кратковременных нагрузок. Сравнение прогибов, горизонтальных перемещений и ускорений этажей с предельно допустимыми значениями показало, что они не превышают максимально допустимых значений.

Ключевые слова: параметрическая архитектура, информационное моделирование, уникальное здание, формообразование, метод конечных элементов, расчетная модель

Для цитирования: Э.К. Агаханов, М.К. Агаханов, Е.В. Труфанова, А.З. Джабраилов. Моделирование каркаса уникального здания параметрической архитектуры на основе применения поверхности «цилиндр-цилиндр». Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025; 52(1):193-201. DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-1-193-201

**Modeling the frame of a unique building of parametric architecture based
on the application of the "cylinder-cylinder" surface**

E.K. Agakhanov¹, M.K. Agakhanov², E.V. Trufanova³, A.Z. Dzhabrailov¹

¹Daghestan State Technical University,

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

²Moscow State University of Civil Engineering (National Research University MGSU),

²26 Yaroslavskoe highway, Moscow 129337, Russia,

³Don State Technical University,

³1 Gagarin Square, Rostov-on-Don 344000, Russia

Abstract. Objective. The article considers information modeling of the frame of a unique building of parametric form in the software packages SAPFIR and LIRA-SAPR. This type of architecture is just beginning to develop in Russia, unlike other large cities of the world, which is becoming dominant. **Method.** At the first stage, the formation of a rotary surface with axoids "Cylinder-cylinder" formed by a straight line intersecting the axis of the movable cylinder, during external rolling, was considered. Varying the parameters made it possible to obtain a number of surfaces suitable for creating a parametric form of the frame of a unique building. A surface with five convex parts is adopted. The streamlined shapes of the object allow optimizing wind flows and protect against the formation of snow bags, which is relevant. **Result.** A modal analysis was carried out for the first version of the system modeling. Calculation of deformations under the action of constant, temporary long-term and short-term loads was performed. A comparison of deflections, horizontal displacements and accelerations of floors with maximum permissible values was carried out. **Conclusion.** The results of the study allow choosing the optimal variant of the analytical rotational surface. The calculation of deformations under the action of constant, temporary long-term and short-term loads is performed. Comparison of deflections, horizontal displacements and accelerations of floors with maximum permissible values showed that they do not exceed the maximum permissible values.

Keywords: parametric architecture, information modeling, unique building, shaping, finite element method, calculation model.

For citation: E.K. Agakhanov, M.K. Agakhanov, E.V. Trufanova, A.Z. Dzhabrailov. Modeling the frame of a unique building of parametric architecture based on the application of the "cylinder-cylinder" surface. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2025; 52(1):193-201. (In Russ) DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-1-193-201.

Введение. Проектирование зданий – сложный, многогранный процесс, который содержит обширное количество этапов. Новые материалы и технологии оживляет энтузиазм к разработке проектов с уникальными формами, как с точки зрения архитектуры, так и с точки зрения проектирования. В этом вопросе множество геометрических конфигураций зданий, фасадных решений и каркасов зданий и сооружений значительно зависит от формы, выбранной поверхности. Возможность реализации сложных форм параметрической архитектуры стала более доступна благодаря применению в проектировании современных цифровых информационных технологий.

Постановка задачи. В современном строительстве при проектировании уникальных зданий становится все более актуальным применение параметрической модели различных поверхностей, поскольку возникает стремление к созданию чего-то нового [1-3].

Рассмотрим ротативная поверхность с аксоидами «Цилиндр-цилиндр», образованная прямой, пересекающей ось подвижного цилиндра при наружном обкатывании (рис. 1).

Пусть образующая прямая задана в подвижной системе координат $O_1X_1Y_1Z_1$ в виде: $X_1=u$; $Y_1=0$; $Z_1=H(a-u)(a+b)$, где a , b , H - константы. В этом случае параметрические уравнения линейчатой ротативной поверхности, образуемой прямой образующей при внешнем качении без скольжения подвижного цилиндра с радиусом r по цилинду с радиусом R , можно представить в виде:

$$\begin{aligned}x &= x(u, \varphi) = (R + r) \cos \varphi + u \cos(n + 1)\varphi; \\y &= y(u, \varphi) = (R + r) \sin \varphi + u \sin(n + 1)\varphi; \\z &= \frac{H(a-u)}{a+b},\end{aligned}$$

где, r – параметр, определяющий радиус внешнего подвижного цилиндра; R – параметр, определяющий радиус цилиндра, вокруг которого происходит обкатывание; n – количество выпуклых частей поверхности в плоскости XY ; a – ширина раскрытия оболочки по направлению OX ; b – ширина раскрытия оболочки по направлению OY ; H – высота цилиндра, вокруг которого происходит обкатывание.

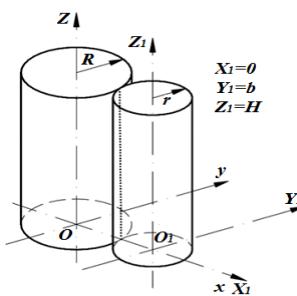


Рис. 1- Ротативная поверхность с аксоидами «Цилиндр-цилиндр»
 Fig. 1 - Rotational surface with axoids "Cylinder-cylinder"

Методы исследования. Рассматриваемые линейчатые ротативные поверхности являются поверхностями отрицательной гауссовой кривизны. Для исследования эволюции формообразования используется генератор линий и поверхностей в программном комплексе САПФИР (рис. 2) [4-6].

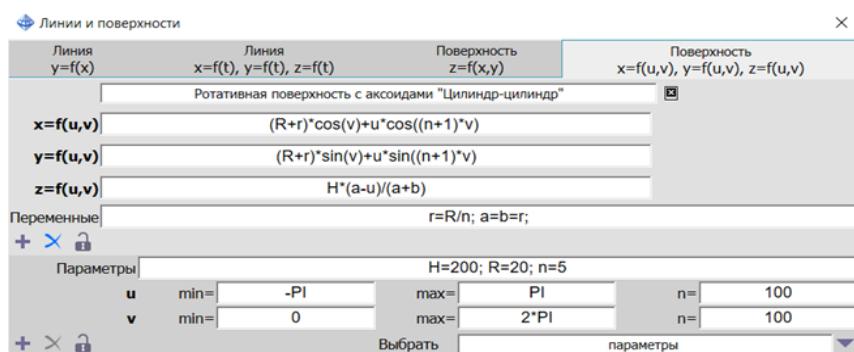


Рис. 2 - Генератор линий и поверхностей в ПК САПФИР
 Fig. 2 - Generator of lines and surfaces in SAPFIR PC

На рис. 3 приведены ротативные поверхности с различными формами образования при варьировании параметра n . Что показывает, как зависит количество выпуклых частей поверхности в плоскости XY от параметра n . Для проектирования здания принята поверхность с пятью выпуклыми частями (рис. 3в).

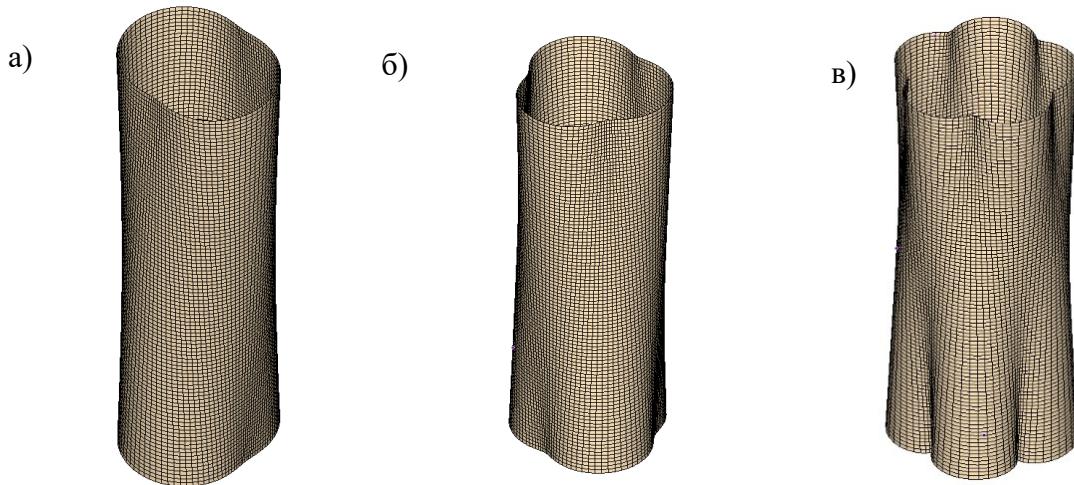


Рис. 3- Варьирование количеством выпуклых частей: а) $n = 2$; б) $n = 3$; в) $n = 5$
 Fig. 3 - Varying the number of convex parts: a) ; b) ; c) .

На следующем этапе определена ширина раскрытия оболочки по верхнему контуру. Окончательно принимаем значение $-\pi \leq v \leq \pi$. При варьировании предела вращения прямой корректируются границы z и параметры v, H, R (рис. 4-6).

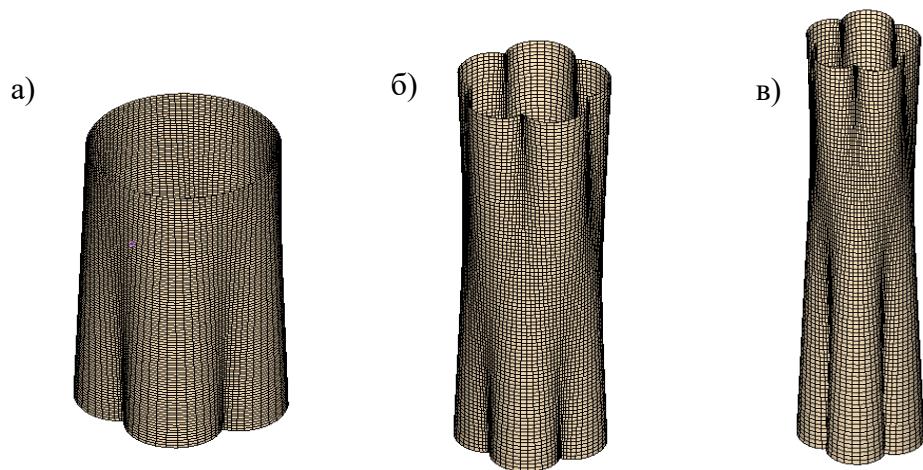


Рис. 4 - Варьирование параметра v : а) $0 \leq v \leq \pi$; б) $-\pi \leq v \leq \pi$; в) $-\pi \leq v \leq 2\pi$
 Fig. 4 - Variation of the parameter: a) $0 \leq v \leq \pi$; b) $-\pi \leq v \leq \pi$; c) $-\pi \leq v \leq 2\pi$

При изменении параметра H , подбираем оптимальную высоту здания, принято $H = 112$ (рис.5).

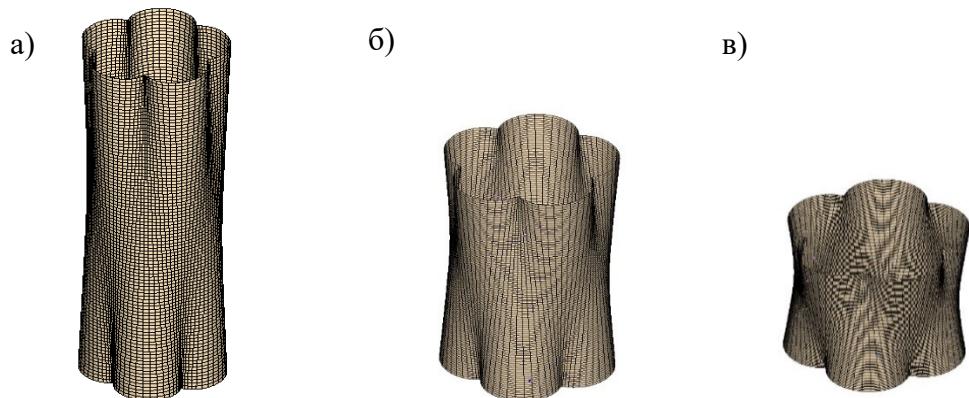


Рис. 5- Варьирование параметра H : а) $H = 200$; б) $H = 100$; в) $H = 50$
 Fig. 5- Variation of parameter H: a) $H = 200$; b) $H = 100$; c) $H = 50$

При изменении параметра R , от которого зависит радиус цилиндра, вокруг, которого происходит обкатывание, мы влияем на радиус раскрытия оболочки. В работе принято значение $R = 20$.

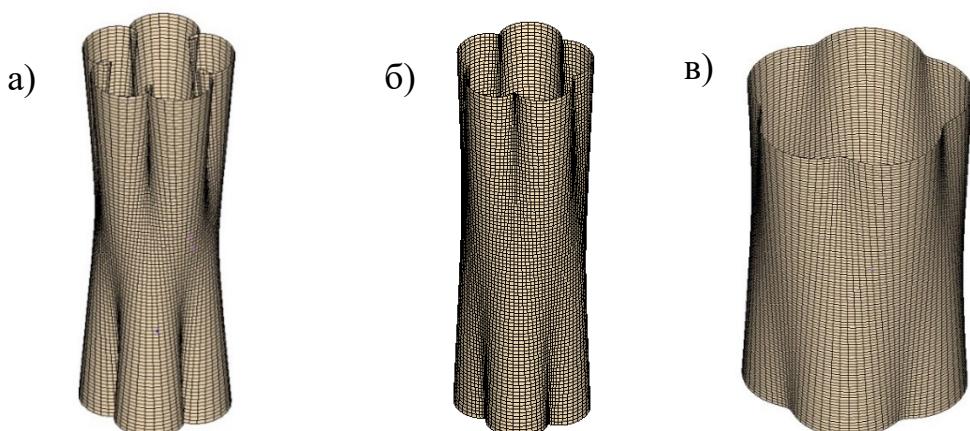


Рис. 6 - Варьирование параметра R : а) $R = 15$; б) $R = 20$; в) $R = 30$
 Fig. 6 - Variation of parameter R: a) $R = 15$; b) $R = 20$; c) $R = 30$

При вариации числа конечных элементов изменяется обтекаемость формы (рис. 7).

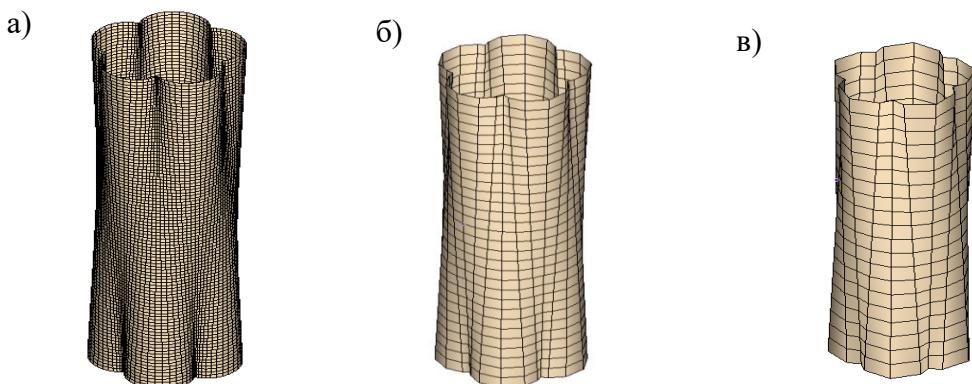


Рис. 7-Варьирование количества конечных элементов по периметру поверхности:

а) 50 конечных элементов; б) 30 конечных элементов; в) 20 конечных элементов

Fig. 7-Variation of the number of finite elements along the surface perimeter:

a) 50 finite elements; b) 30 finite elements; c) 20 finite elements

Обсуждение результатов. Создание физической (архитектурной) и аналитической модели объекта исследования реализовано в программных комплексах из одного семейства – ЛИРА САПР 2020 R3.1 и САПФИР-3Д 2020 R3.1. Программа САПФИР удобна тем, что реализует в себе принцип дуального представления модели, суть которого заключается в том, что оба типа модели обрабатываются совместно, позволяя создавать проект из различных элементов, оперируя их архитектурными моделями (стена, колонна, плита, стропильные конструкции и другие), и в то же время – незаметно формируя основу для расчета. Ввиду общего родства программ передача аналитической модели из САПФИР в ЛИРА для осуществления комплекса вычислительных процессов происходит без каких-либо проблем.

Формирование каркаса начинается с построения фундаментной плиты, плит перекрытия и плиты покрытия, которые повторяют форму модели. Исходя из их форм и размеров подбираются оптимальные сечения вертикальных несущих элементов (рис. 8).

Фундаментная плита принята монолитная железобетонная толщиной 1600 мм из бетона B40 W12 F200 [7]. Плиты перекрытий и плита покрытия приняты толщиной 220 мм из бетона B60 W4 F75. Размеры ядра жесткости приняты исходя из расчета количества вертикального транспорта. Стены приняты толщиной 300 мм из бетона B60 W4 F75.

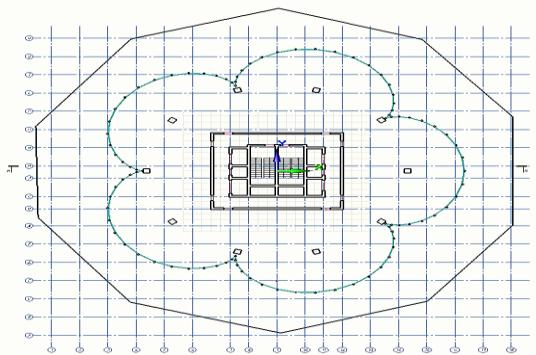


Рис. 8 - План 1-го этажа

Fig. 8 - 1st floor plan

В связи с тем, что форма имеет различный радиус, на первом и последнем этаже, максимальный, а на 18-ом минимальный, принято решение установить колонны в краях «лепестка», первого и последнего этажа, сечением 700x700 из бетона B60 W4 F75.

Для устранения консольности на краях плит принято решение установить по контуру поверхности металлический каркас, из труб 219x8 мм из стали С245 по ГОСТ 10704-91 (рис. 9). Для обеспечения жесткости здания запроектированы аутригерные конструкции на 11-ом, 22-ом и 33-ом этажах [8-9].

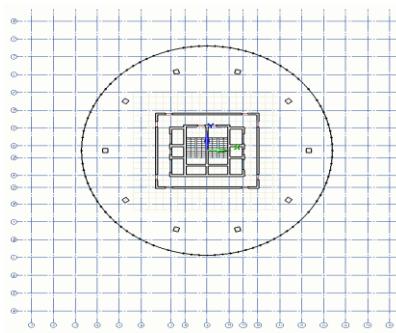


Рис. 9- План 18-го этажа
Fig. 9 - 18th floor plan

Это стены толщиной 300 мм, которые проходят от ядра жесткости, пересекаясь с колоннами, связывая их и проходят через центр «лепестка» (рис. 10) [10-11].

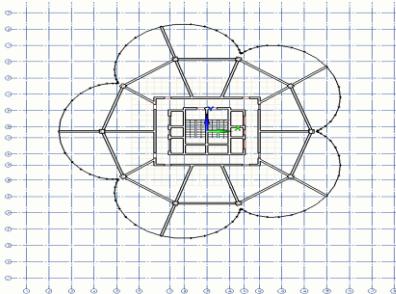


Рис. 10- План 34-го аутригера этажа
Fig. 10 - Plan of the 34th outrigger floor

После построения архитектурной модели выполнено преобразование в аналитическую (рис. 11).

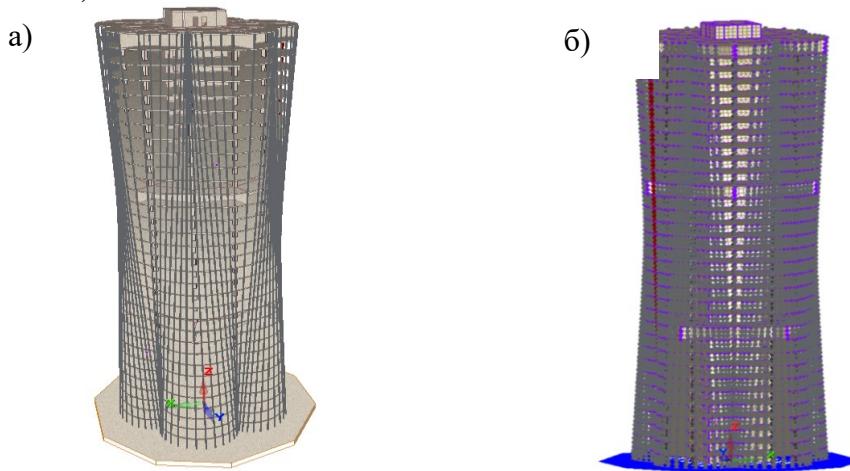


Рис. 11- Модели здания: а) физическая; б) аналитическая
Fig. 11- Building models: a) physical; b) analytical

Для этого настроены параметры сетки триангуляции. В процессе преобразования выполняется автоматическое двойное дотягивание, исправление возможных ошибок конструкций и передача созданной модели в ПК ЛИРА-САПР.

Элементам каркаса назначены типы жесткости (рис. 12): фундаментная плита – пластина толщиной 160 см; плиты перекрытий и покрытия – пластина толщиной 22 см; стены ядра жесткости, лифтовых шахт и лестничных клеток – пластина толщиной 30 см; стены аутригера конструкций – пластина толщиной 30 см; прямые колонны – брус 70x70 см; металлические колонны – труба круглая 219x8.

Модальный анализ проведен для первого варианта моделирования системы. Сформировано отдельное динамическое загружение, для которого происходит сбор масс со всех ранее приложенных статических загружений, включая собственный вес конструкций.

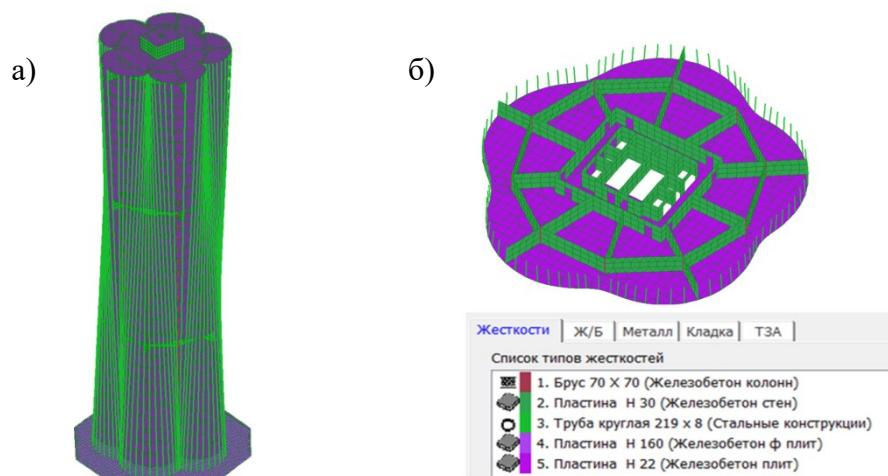


Рис. 12 - Жесткости конечно-элементной модели: а) модель здания; б) аутригерный этаж
 Fig. 12 - Stiffness of the finite element model: a) building model; b) outrigger floor

Первая форма колебаний каркаса – поступательная вдоль направляющей, находящейся относительно оси ОY (рис. 13а). Вторая форма колебаний каркаса – поступательная вдоль направляющей, находящейся относительно оси ОХ (рис.13б). Третья форма колебаний каркаса – кручение относительно центра здания (рис.13в).

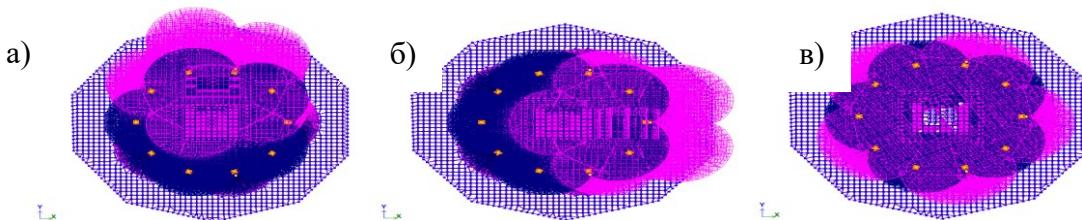


Рис. 13- Формы колебаний каркаса: а) 1 форма; б) вторая форма; в) третья форма
 Fig. 13 - Frame oscillation modes: a) 1 mode; b) second mode; c) third mode

Во всех каркасах главные формы колебаний представляют собой поступательные и крутильные. Расстановка диафрагм жесткости (колонн и стен) подобрана верно, обеспечивая достаточную жесткость здания. Выполнен расчет по деформациям на действие постоянных, временных длительных и кратковременных нагрузок (рис. 14, 15).

Проведено сравнение прогибов, горизонтальных перемещений и ускорений этажей с предельно допустимыми значениями.

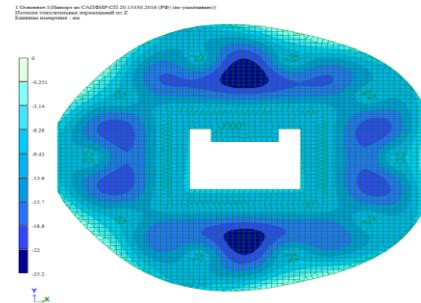


Рис. 14- Изополя относительных вертикальных перемещений
 Fig. 14 - Isopfields of relative vertical displacements

Максимальный прогиб плиты перекрытия составил 25.2 мм. В соответствии с действующей нормативной документацией вертикальный предельный прогиб не должен превышать $L/200$. Пролет в месте максимального прогиба составил 6800 мм, прогиб не должен превышать $6800/205 = 25.2$ мм. Следовательно, предельные прогибы не превышают максимально допустимых значений. Предельные горизонтальные деформации составляют $f_{ult} = 3.06$ мм, при высоте здания 112.4 м, что не превышает предельно допустимых значений $f_{ult} = h/500 = 112400/500 = 224.8$ мм.

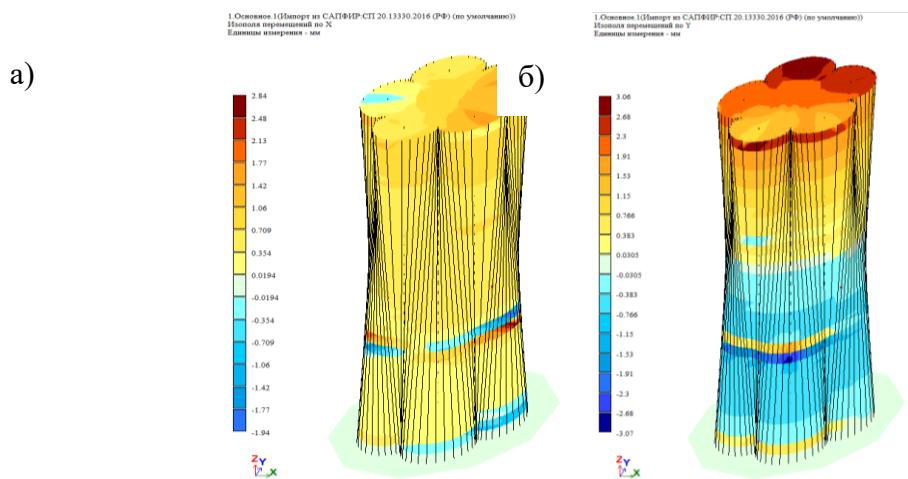


Рис. 15 - Горизонтальные перемещения: а) по оси X; б) по оси Y
 Fig. 15 - Horizontal movements: a) along the X axis; b) along the Y axis

Вывод. Проведенное исследование эволюции формообразования объекта параметрической архитектуры позволяет выбрать оптимальный вариант аналитической ротативной поверхности. Разработана аналитическая модель каркаса уникального здания высотой 112 м. Импорт в программный комплекс Лира-САПР позволил получить расчетную схему объекта. Методом конечных элементов определено напряженно-деформированное состояние и динамические характеристики полученных моделей для оценки надежности, устойчивости и экономичности принятых проектных решений. Разработанные конструктивные решения зданий параметрической архитектуры полностью отвечают требованиям норм Российской Федерации.

Библиографический список:

- Надыршин Н.М. Параметризм как стиль в архитектурном дизайне. Вестник ОГУ. 2013. № 1.С. 53-57.
- Бардайкин Д.О. Обзор конструктивных решений высотных зданий //Международный научный журнал «Вестник науки»,2020, № 7(28),Т.4.С.35-38.<https://www.xn--8sbempcl cwd3bmt.xn--p1ai/article/3470>
- Кравченко Г.М., Манойленко А.Ю., Литовка В.В. «Параметрическая архитектура»//Инженерный вестник Дона, № 2 (2018) URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2018/5040;
- Кравченко Г.М., Труфанова Е.В., Полетаев М.В., Пуданова Л.И.. Эволюция формообразования здания параметрической архитектуры с учетом аэродинамики. Инженерный вестник Дона, 2021,№ 8;
- Шенцова О.М., Казанцева Е.К. Композиционное формообразование высотных зданий и сооружений. Евразийский союз ученых. 2017. № 11-1 (44). С. 5-12.
- Кравченко Г.М., Труфанова Е.В., Данилейко И.Ю., Забейвортова В.А. Исследование принципов формообразования объектов параметрической архитектуры. Инженерный вестник Дона, 2019, № 3.
- Достовал Г., Хая В. Применение высокопрочных бетонов в конструкциях современных высотных зданий // Научно-образовательный журнал для студентов и преподавателей «StudNet» № 6/2022;
- А.Б. Малыгин «Применение аутригерных этажей в высотном строительстве» //Инженерный вестник Дона, № 4 (2022) URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2022/7585;
- Н.И. Закиева, Д.В. Гранкина, К.А. Ким, Д.К. Васильева. Процесс прогрессирующего обрушения высотных зданий и анализ решений, противодействующих ему//Инженерный вестник Дона, № 3 (2019) URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2019/5811;
- Алмазов В.О. Проблемы прогрессирующего обрушения. Строительство и реконструкция. 2014. № 6(56). С.3-10.
- Алмазов В.О., Плотников А.И., Растворгувев Б.С. Проблемы сопротивления зданий прогрессирующему разрушению. Вестник МГСУ. 2011. № 2. С. 15-20.
- Агаханов Э.К., Кравченко Г.М., Труфанова Е.В., Агаханов М.К. Применение информационных технологий при моделировании объекта параметрической архитектуры. Системные технологии. 2023. № 2(47). с. 51-58.
- Агаханов Э.К. О развитии комплексных методов решения задач механики деформируемого твердого тела». Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки, 2013;29(2):39-45. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2013-29-2-39-45>.
- Агаханов Э.К. Развитие комплексных методов в механике деформируемого твердого тела, Материалы Международной научно-практической конференции, ГГНТУ, г. Грозный, 2015. с. 99-105.

15. Агаханов Э. К., Агаханов М. К., Труфанова Е. В., Высоковский Д.А., Джабраилов А.З. Влияние конструктивных решений при динамическом расчете каркаса здания сложной формы. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2024; 51(1):180-186. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2024-51-1-180-186>

References:

1. Nadyrshin N.M. Parametricism as a style in architectural design. *Bulletin of OSU*. 2013;1:53-57 (In Russ.)
2. Bartsaykin D.O. Review of design solutions for high-rise buildings. *International scientific journal "Bulletin of science"* 2020; 7 (28) Vol. 4:35-38; <https://www.xn-8sbempcl cwd3bmt./article/3470> (In Russ.)
3. Kravchenko G.M., Manoylenko A.Yu., Litovka V.V. Parametric architecture. *Engineering Bulletin of the Don*, 2018; 2 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2018/5040; (In Russ.)
4. Kravchenko G.M., Trufanova E.V., Poletaev M.V., Pudanova L.I. Evolution of the formation of a parametric architecture building taking into account aerodynamics. *Engineering Bulletin of the Don*, 2021;8; (In Russ.)
5. Shentsova O.M., Kazantseva E.K. Compositional shaping of high-rise buildings and structures. *Eurasian Union of Scientists*. 2017;11-1 (44):5-12. (In Russ.)
6. Kravchenko G.M., Trufanova E.V., Danileiko I.Yu., Zabeyvorota V.A. Study of the principles of shaping parametric architecture objects. *Engineering Bulletin of the Don*, 2019;3. (In Russ.)
7. Dostvala G., Khaya V. Application of high-strength concrete in the structures of modern high-rise buildings // Scientific and educational journal for students and teachers "StudNet" No. 6/2022; (In Russ.)
8. B. Malygin "Use of outrigger floors in high-rise construction. *Engineering Bulletin of the Don*, 2022;4 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2022/7585; (In Russ.)
9. N.I. Zakieva, D.V. Grankina, K.A. Kim, D.K. Vasilyeva "The process of progressive collapse of high-rise buildings and analysis of solutions to counteract it. *Engineering Bulletin of the Don*, 2019;3 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2019/5811 (In Russ.)
10. Almazov V.O. Problems of progressive collapse. *Construction and reconstruction*.2014;6(56):3-10 (In Russ)
11. Almazov V.O., Plotnikov A.I., Rastorguev B.S. Problems of resistance of buildings to progressive destruction. *Bulletin of MGSU*. 2011;2:15-20. (In Russ)
12. Agakhanov E.K., Kravchenko G.M., Trufanova E.V., Agakhanov M.K. Application of information technologies in modeling an object of parametric architecture. *System technologies*.2023;2(47):51-58. (In Russ.)
13. Agakhanov E.K. On the development of complex methods for solving problems of mechanics of deformable solids. *Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences*. 2013; 29(2):39-45. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2013-29-2-39-45> (In Russ.)
14. Agakhanov E.K. Development of complex methods in mechanics of deformable solids, Proceedings of the International scientific and practical conference, GGTU, Grozny, 2015; 99-105. (In Russ.)
15. Agakhanov E.K., Agakhanov M.K., Trufanova E.V., Vysokovsky D.A., Dzhabrailov A.Z. Influence of design solutions in the dynamic calculation of the frame of a complex-shaped building. *Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences*. 2024;51(1):180-186. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2024-51-1-180-186> (In Russ.)

Сведения об авторах:

Агаханов Элифхан Керимханович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Транспортные сооружения и строительные материалы»; Elifhan@bk.ru

Агаханов Мурад Киримханович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Сопротивление материалов»; muradak@mail.ru

Труфанова Елена Васильевна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Строительная механика и теория сооружений»; el.trufanova@mail.ru

Джабраилов Адалет Залович, аспирант кафедры «Транспортные сооружения и строительные материалы», zalovich84@mail.ru

Information about authors:

Elifkhan K. Agakhanov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Department of Transport Facilities and Construction Materials; Elifhan@bk.ru,

Murad K. Agakhanov, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Assoc. Prof., Department of Strength of Materials; muradak@mail.ru

Elena V. Trufanova, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Assoc. Prof., Department of Technical Mechanics; el.trufanova@mail.ru

Adalet Z. Dzhabrailov, Postgraduate Student, Department of Transport Structures and Building Materials, zalovich84@mail.ru

Конфликт интересов / Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/ Received 24.09.2024.

Одобрена после рецензирования / Reviced 17.11.2024.

Принята в печать /Accepted for publication 20.01.2025.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 625.7/8

DOI: 10.21822/2073-6185-2025-52-1-202-209



Оригинальная статья /Original article

Современные возможности применения цементобетона

при строительстве дорожных одежд

М.Р. Гусейнов¹, Д.Н. Селимханов²

¹Дагестанский государственный технический университет,

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

²Махачкалинский филиал Московского автомобильно-дорожного
государственного технического университета (МАДИ),

²367026, г. Махачкала, просп. Али-Гаджи Акушинского, 13, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является развитие теоретических и практических аспектов применения цементобетона в строительстве дорожных одежд, а также определение перспективы развития технологий его производства. **Метод.** В ходе исследования применен метод модификации цементной матрицы на наноуровне для улучшения эксплуатационных характеристик цементобетонного покрытия. **Результат.** Произведен расчет подбора толщины цементобетонного покрытия, основанного на гипотезе Фусса-Винклера. Особое внимание уделяется модификациям, позволяющим увеличивать устойчивость цементобетона к циклическим нагрузкам и температурным колебаниям. Поскольку гидратные фазы бетона имеют толщину в пределах 1-100 нм, то введение специальных добавок может обеспечить армирование цементного вяжущего на микроуровне. **Вывод.** Уникальные свойства цементобетона с современными технологиями укладки, уплотнения и ухода, использование наночастиц в цементной матрице способствуют более равномерному заполнению пор, улучшению прочности и преждевременного старения бетона, что является важным фактором для транспортной системы России.

Ключевые слова: цементобетон, уплотнение, автомобильная дорога, транспортная нагрузка, модуль упругости, основание, плита, деформация, транспортный поток, напряжение

Для цитирования: М.Р. Гусейнов, Д.Н. Селимханов. Современные возможности применения цементобетона при строительстве дорожных одежд. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025;52(1):202-209.
DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-1-202-209

Modern possibilities of using cement concrete in road construction

M.R. Guseinov, D.N. Selimkhanov

¹Daghestan State Technical University,

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

²Makhachkala branch Moscow Automobile and Road State Technical University (MADI),

²13 Ali-Gadzhi Akushinsky Ave., Makhachkala 367026, Russia

Abstract. Objective. The aim of the study is to develop theoretical and practical aspects of the use of cement concrete in the construction of road pavements, as well as to determine the prospects for the development of its production technologies. Method. The study used a method for modifying the cement matrix at the nanolevel to improve the performance characteristics of the cement concrete pavement. **Result.** The calculation of the selection of the thickness of the cement concrete pavement based on the Fuss-Winkler hypothesis was made. Particular attention is paid to modifications that increase the resistance of cement concrete to cyclic loads and temperature fluctuations. Since the hydrated phases of concrete have a thickness within 1-100 nm, the introduction of special additives can provide reinforcement of the cement binder at the micro

level. **Conclusion.** The unique properties of cement concrete with modern technologies of laying, compaction and maintenance, the use of nanoparticles in the cement matrix contribute to a more uniform filling of pores, improvement of strength and premature aging of concrete, which is an important factor for the transport system of Russia.

Keywords: cement concrete, compaction, highway, transport load, modulus of elasticity, base, slab, deformation, traffic flow, stress

For citation: M.R. Guseinov, D.N. Selimkhanov. Modern possibilities of using cement concrete in road construction. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2025; 52(1):202-209. (In Russ) DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-1-202-209.

Введение. Цементобетон, как один из основных строительных материалов, занимает ключевую позицию в дорожном строительстве благодаря своим уникальным физико-механическим свойствам, таким как высокая прочность, долговечность и устойчивость к воздействию различных климатических условий.

В последние десятилетия, с учетом стремительного развития инфраструктуры и увеличения транспортных потоков, актуальность применения цементобетона в строительстве дорожных одежд возросла многократно. В условиях модернизации инфраструктуры республики Дагестан, где требуется не только создание новых дорог, но и реконструкция существующих, цементобетон становится незаменимым материалом, способным обеспечить долговечность и надежность дорожных покрытий [2-7].

Для пропуска современных большегрузных транспортных средств с нагрузками не менее 12-13 т на ось с одновременным увеличением межремонтных сроков привели проектировщиков к выводу, что оптимальным является возвращение к дорожным одеждам жесткого типа – цементобетонным покрытиям.

Увеличились объемы тяжеловесных перевозок, осуществляемых иностранными перевозчиками в международном сообщении. Транспортные нагрузки, воспринимаемые дорожными одеждами по своей величине (осевой нагрузке) и степени воздействия (количество автопоездов с двух и трехосными тележками) значительно возросли. Увеличение силового воздействия на дорожные конструкции не может не сказаться на транспортно-эксплуатационном состоянии автомобильных дорог, запроектированных под нагрузки до 10 т. Снижение прочности и возможности распределять напряжение в наиболее прочных слоях увеличивает нагрузку на менее прочные слои основания.

В результате значительные объемы недоремонтов могут привести к ситуации, когда на некоторых участках автомобильных дорог восстановление несущей способности конструкции путем устройства верхних слоев покрытия будет невозможно по причинам нарушения структурной сплошности и снижении прочности слоев основания дорожных одежд. Определить фактический срок службы дорожных одежд при различных условиях эксплуатации автомобильных дорог невозможно без учета причин, снижающих их долговечность, основными из которых являются: причины, зависящие от качества строительства или ремонта, и причины, зависящие от условий эксплуатации [8-12, 15].

Постановка задачи. Устройство дополнительных слоев усиления из традиционного асфальтобетона на существующих дорогах с покрытием из асфальтобетона ограничивается его неустойчивостью к воздействию тяжелых транспортных нагрузок в условиях высоких температур в летнее время, что приводит к образованию на покрытии необратимых деформаций в виде колеи и т.п.

Целью настоящей работы является обеспечение стабильности дорожной конструкции в условиях сложного нагружения за счет повышения устойчивости цементобетона к циклическим нагрузкам и температурным колебаниям в допустимых пределах.

Методы исследования. Основными характеристиками при расчете на сдвигостойчивость в дорожных конструкциях являются показатели внутреннего сцепления и трения, а также действующие напряжения в плоскости сдвига. В связи с этим возникла

потребность определения напряжений (касательных и нормальных) в дорожных конструкциях от действия тяжелой транспортной нагрузки (130 кН на ось), принятой за рубежом. При воздействии вертикальной и горизонтальной составляющей нагрузки наиболее сдвигопасной областью дорожной одежды является непосредственно покрытие. Следует отметить, что при снижении толщины покрытия некоторая часть касательных напряжений воспринимается основанием.

Применяя для расчета дорожных конструкций как наиболее рациональный метод конечных элементов, позволяющей учитывать как горизонтальную составляющую нагрузку, так и разномодульность слоев дорожной одежды, был получен ряд опытных данных. При воздействии на покрытие как вертикальной, так и горизонтальной нагрузки изменяется картина распределения напряжений. Максимальные значения напряжений перемещаются к поверхности асфальтобетонного слоя.

Следовательно, при воздействии вертикальной и горизонтальной составляющей нагрузки наиболее сдвигопасной областью дорожной одежды является непосредственно покрытие. При снижении толщины верхнего слоя, некоторая часть касательных напряжений воспринимается основанием (рис.1).

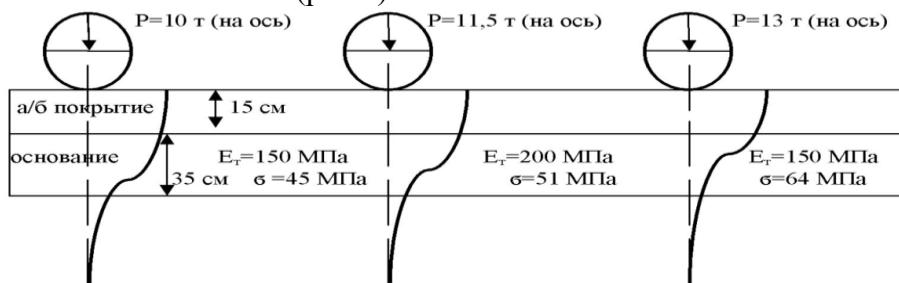


Рис. 1 - Напряжения в дорожной конструкции от действия транспортной нагрузки:
Е_т - требуемый модуль упругости дорожной конструкции; σ - нормальные напряжения
в слоях дорожной одежды

Fig. 1 - Stresses in the road structure from the action of transport load: Е_т - required modulus of elasticity of the road structure; σ - normal stresses in the layers of the road surface

Асфальтобетон, даже с большим содержанием щебня (щебеночно-мастичный), не способен воспринять тяжелые транспортные нагрузки. Расчеты показали, что при увеличении транспортной нагрузки до 13 т на ось напряжения в слоях покрытия составляют не менее 7,0-7,5 МПа, что в 2...2,5 раза выше предела прочности на сдвиг при 50 °С асфальтобетонов типа «А».

Можно предложить три выхода из сложившейся ситуации:

1. Разборка (фрезерование) старых асфальтобетонных покрытий и применение полученного асфальтогранулята для расклинцовки щебеночных оснований.

2. Применение комбинированных оснований, в которых на слой старого асфальтобетонного покрытия укладывается арматура из геосеток или георешеток, или после старой дорожной одежды армирующие прослойки укладываются под слой щебеночного основания.

3. Использование в качестве основания старого асфальтобетонного покрытия при устройстве покрытия дорожной одежды из цементобетона.

Мероприятия первой и второй групп применимы при новом строительстве или реконструкции автомобильных дорог, когда есть возможность переустроить дорожную одежду. Изучение европейского опыта свидетельствует, что для восприятия повышенных транспортных нагрузок реконструкцию существующих автомобильных дорог необходимо вести с применением именно цементобетона – с устройством тонкослойных цементобетонных конструкций усиления (технология «white topping»). При этом старое покрытие, будь то цементобетон или асфальтобетон, используется в качестве основания новой дорожной одежды.

Обсуждение результатов. Преимущества данного способа повышения несущей способности дорожных одежд очевидны. Сведения по статическим данным показывают, что автомобильные дороги с цементобетонными покрытиями, построенные ещё в прошлом столетии, не потеряли своих транспортно-эксплуатационных качеств до сих пор, не исчерпали своей прочности, долговечности, несущей способности и при соответствующем уходе продолжают служить и сегодня. Следует отметить экономичность таких дорог (при всех затратах на устройство цементобетонного покрытия толщиной 10-15 см приведенные затраты на строительство и содержание дороги оказываются в 1,5 раза ниже затрат на устройство асфальтобетонного покрытия.

На увеличение объемов строительства автомобильных дорог с цементобетонными покрытиями оказывается отсутствие соответствующих средств механизации и автоматизации. В последнее десятилетие изменилась мировая практика технологии строительства цементобетонных покрытий в связи с переходом на бетоноукладочные комплексы со скользящими опалубками производства Германии, США и других стран с укладкой цементобетона высокой плотности.

Цементобетонное покрытие за счет устройства в нем продольных и поперечных деформационных швов получается как бы разбитым на отдельные плиты. Известны различные формулы для расчета дорожных плит.

В конструкциях бетонных покрытий важное значение имеют швы, которые образуют наиболее уязвимые места, особенно в монолитных бетонных покрытиях. Поэтому следует стремиться к уменьшению количества и протяженности швов.

Если в монолитных бетонных покрытиях расстояние между швами является функцией температурных напряжений, возникающих в плитах, и зависит от амплитуды изменения температуры и коэффициента трения плиты по основанию и колеблется в пределах от 6 до 20 м, то в сборных покрытиях температурные напряжения, вследствие сравнительно небольших линейных размеров плит (до 4 м), имеют второстепенное значение. В связи с этим, обычно в сборных покрытиях специальных температурных швов не устраивают.

Формулы Вестергаарда для расчета толщины дорожных плит, основанные на гипотезе Фусса-Винклера, содержат коэффициент постели K . Профессор Иванов Н.Н. произвел замену K на модуль деформации основания E_0 в формулах Вестергаарда для середины и края плиты. При этой замене им была использована зависимость между K и E_0 , данная проф. Герсевановым Н.М. в случае бесконечно длинной балки [1,13,14].

Зависимость между K и E_0 в условиях работы основания, как пространственной системы, будет иметь вид

$$K = \frac{Eh^3}{R^4 \cdot 10a_0}, \quad (1)$$

где, E – модуль упругости цементобетона; h – толщина плиты; R – радиус следа от нагрузки, считаемый круглым, причем предполагается, что $R > 0,5h$; a_0 – параметр, определяемый по табл. 1 в зависимости от характеристики:

$$\frac{R}{h} \sqrt[3]{\frac{E_0}{E} \cdot \frac{(1 - \mu^2)}{(1 - \mu_0^2)}}$$

где, μ, μ_0 – коэффициенты Пуассона для цементобетона и основания соответственно.

Таблица 1. Рекомендуемые параметры a_0 при расчете формулы 1
Table 1. Recommended parameters a_0 when calculating the formula

$\frac{R}{h} \sqrt[3]{\frac{E_0}{E} \cdot \frac{(1 - \mu^2)}{(1 - \mu_0^2)}}$	0,027	0,05	0,11	0,165	0,22	0,33	0,44	0,55	0,66	0,88	1,1	Рекомендуемые a_0
a_0	6,31	5,10	3,82	3,17	2,71	2,03	1,59	1,26	0,985	0,67	0,45	3,85

Совершим замену K в формулах Вестергаарда, используя формулу (1).

Формула Вестергаарда для наибольшего напряжения σ в трех случаях (рис. 2) имеет вид

I случай – груз P в углу плиты

$$\sigma_I = \frac{3P}{h^2} \left\{ 1 - \left[\frac{12(1-\mu^2)K}{Eh^3} \right]^{0.15} \cdot (R\sqrt{2})^{0.6} \right\}, \quad (2)$$

II случай – груз P у края плиты

$$\sigma_{II} = 0,529(1 + 0,54\mu) \cdot \frac{P}{h^2} \left[\lg \frac{Eh^3}{KR^4} - 0,71 \right], \quad (3)$$

III случай – груз P на середине плиты

$$\sigma_{III} = 0,275(1 + \mu) \cdot \frac{P}{h^2} \lg \frac{Eh^3}{KR^4}, \quad (4)$$

Подставив K из уравнения (1) и (2), получим:

$$\sigma_I = \frac{3P}{h^2} \left\{ 1 - \left[\frac{12(1-\mu^2)}{10\alpha_0} \right]^{0.15} (\sqrt{2})^{0.6} \right\}, \quad (5)$$

Обозначив

$$\alpha_I = 3 \left\{ 1 - \left[\frac{12(1-\mu^2)}{10\alpha_0} \right]^{0.15} (\sqrt{2})^{0.6} \right\}, \quad (6)$$

и учитывая, что σ_I не должно превосходить допустимого напряжения на растяжение при изгибе $[\sigma]$, получим из (5):

$$h = \sqrt{\frac{\alpha_I P}{[\sigma]}}, \quad (7)$$

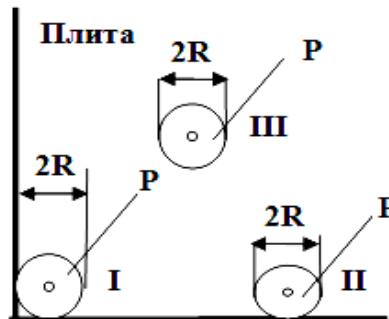


Рис. 2- Максимальное напряжение σ в плите при определении толщины в углу плиты, на краю плиты и в средней части плиты

Fig. 2- Maximum stress σ in the slab when determining the thickness in the corner of the slab, at the edge of the slab and in the middle part of the slab

Таким же образом получится:

$$\sigma_{II} = 0,529(1 + 0,54\mu) \cdot \frac{P}{h^2} (\alpha_0 - 0,71), \quad (8)$$

$$h = \sqrt{\frac{\alpha_{II} P}{[\sigma]}}, \quad (9)$$

где $\alpha_{II} = 0,529(1 + 0,54\mu)(\alpha_0 - 0,71)$ (10)

Наконец $\sigma_{III} = 0,275(1 + \mu) \cdot \frac{P}{h^2} \alpha_0$ (11)

$$h = \sqrt{\frac{\alpha_{III} P}{[\sigma]}}, \quad (12)$$

где $\alpha_{III} = 0,275(1 + \mu)\alpha_0$ (13)

Таблица 2. Рекомендуемые параметры a_i при значении $\sigma=0,15$
Table 2. Recommended parameters a_i for $\sigma=0.15$

$\frac{R}{h} \sqrt[3]{\frac{E_0}{E} \cdot \frac{(1-\mu^2)}{(1-\mu_0^2)}}$	0,027	0,055	0,11	0,165	0,22	0,33	0,44	0,55	0,66	0,88	1,1	Рекомендуемые a_i при расчете по формуле (14)
a_{I}	2,39	2,08	1,57	1,217	0,9	0,357	-	-	-	-	-	1,42
a_{II}	3,35	2,47	1,77	1,40	1,14	0,754	0,50	0,31	0,15	-	-	1,82
a_{III}	2,0	1,61	1,21	1,01	0,86	0,64	0,50	0,40	0,32	0,21	0,14	1,22

Таким образом, для всех трех случаев формулы (7), (9), (11) имеют единый вид:

$$h = \sqrt{\frac{a_i P}{[\sigma]}}, \quad (14)$$

причем $i=I$ при определении толщины в углу плиты; $i=II$ при определении толщины на краю плиты; $i=III$ при определении толщины в средней части плиты;

В табл. 2 приведены параметры a_i при значении $\sigma=0,15$. Как видно из формул, параметры a_i являются функциями параметра a_0 , приведенного в табл. 1.

Поэтому параметры a_i даны в зависимости от той же характеристики, что и a_0 , т.е. в зависимости от значения:

$$\frac{R}{h} \sqrt[3]{\frac{E_0}{E} \cdot \frac{(1-\mu^2)}{(1-\mu_0^2)}}$$

Сравнивая между собой параметры a_i при $i=I, II, III$, видим, что формула (12) дает для середины и угла плиты меньшее значение h , чем для края плиты при одном и том же P . Этим объясняется, что наибольшая относительная деформация, вызванная переменной нагрузкой на автодорогах с цементобетонными покрытиями, возникает на краю плиты на нижней кромке в зоне поперечных швов.

Приведенные формулы имеют практическое применение для предварительных расчетов подбора толщины цементобетонного покрытия, поскольку учитывают коэффициент постели K из условий пространственной работы плиты и упругого основания, а также позволяют выразить толщину плиты h в виде явной функции от P и $[\sigma]$. При этом надо иметь в виду, что пока нет решения для полубесконечной плиты, нагруженной вблизи края или в углу и лежащей на упругом полупространстве.

Перенос европейского опыта по устройству тонкослойных слоев усиления из цементобетона и новых дорог с цементобетонным покрытием в условиях Республики Дагестан осложняются рядом факторов, основным из которых является многократное замораживание – оттаивание вследствие образования гололеда, что предопределяет применение большого расхода противогололедных реагентов (как правило, хлоридов). В результате наблюдается разрушение поперечных швов, образование большого числа трещин, шелушение бетона и т.п.

Вывод. Проблема повышения прочности бетона на современном уровне развития науки может быть решена путем использования нанотехнологий. Поскольку гидратные фазы цемента имеют толщины в пределах 1-100 нм, то введение специальных добавок может обеспечить армирование цементного вяжущего на микроуровне.

Многие предположения в этом направлении пока ещё не вышли на практически применяемый уровень. В настоящее время целесообразнее использовать в этих целях поверхностно-активные вещества (ПАВ), имеющие длину молекулярной цепи в пределахnanoуровня.

Применение ПАВ в виде натриевых солей карбоновых кислот с длиной углеродной цепи С18-С21 в пределах 60-70 нм позволяет увеличить прочность бетона на активированном минеральном заполнителе на 12% при сжатии и на 42% при растяжении (при расходе цемента 350 кг/м³).

В целом перед цементобетонными покрытиями открываются новые перспективы, включая использование не только традиционных, но и инновационных материалов и технологий, способствующих улучшению его свойств.

Разработка эффективных методов старения и деградации цементобетона станет одним из направлений для дальнейших изысканий, что даст возможность значительно увеличить срок службы дорожных покрытий, сделав их более конкурентоспособными.

Библиографический список:

1. Перспективы применения тонкослойных цементобетонных дорожных покрытий в условиях роста транспортных нагрузок: [прочность цементобетонных дорожных покрытий] / Алексей Владимирович Бусел, А.И. Смыковский, Татьяна Анатольевна Чистова // Проблемы современного бетона и железобетона: [сборник трудов] : в 2 ч. / Национальная академия наук Республики Беларусь, Союз строителей Беларуси, Институт БелНИИС; [редкол.: М. Ф. Марковский (отв. ред.) [и др.]. – Минск: Стринко, 2007. - Ч.1 : Бетонные и железобетонные конструкции / отв. ред. М.Ф. Марковский. – 2007. – С.105–112.
2. Бусел А.В., Смыковский А.И., Чистова Т.А. Технологии бетонов. - 2008. №2. – С.68-70.
3. Иванов П.Н. Современные технологии применения цементобетонов в дорожном строительстве // Строительные материалы. – 2021. – № 8. – С. 15–22.
4. Гасанов Т.Г., Батманов Э.З., Гусейнов М.Р. Определение интенсивности городского движения в условиях Республики Дагестан//Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). 2014. № 3 (34). С. 98–102.
5. Батманов Э.З., Гасанов Т.Г., Гусейнов М.Р. Влияние дорожных условий на снижение устойчивости автомобильного транспорта в условиях Республики Дагестан. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2016. Т. 40. № 1. С. 119–132.
6. Сидоров А.В. Исследование прочностных характеристик цементобетонов для дорожных покрытий // Дороги и мосты. – 2020. – № 3. – С. 34–38.
7. Кузнецов И.И. Инновационные решения в строительстве цементобетонных дорог // Журнал строительных технологий. – 2022. – № 1. – С. 88–96.
8. Антонов Б.А. Роль добавок в улучшении свойств цементобетонов для дорожных одежд // Строительные исследования. – 2019. – № 12. – С. 45–50.
9. Петрова С.В. Экологические аспекты использования цементобетонов в дорожном строительстве // Экология и строительство. – 2021. – № 4. – С. 72–77.
10. Григорьев Д.Л., Найденов Е.И. Современные подходы к диагностике состояния цементобетонных дорог // Научные труды строительного университета. – 2020. – Т. 48. – С. 102–108.
11. Федоров А.С. Влияние климатических условий на долговечность цементобетонных покрытий // Строительство и архитектура. – 2023. – № 2. – С. 110–115.
12. Смирнова Н.М. Использование новых технологий в производстве цементобетона для строительства дорожных одежд // Новые материалы. – 2022. – № 6. – С. 49–55.
13. Ильина Т.В. Современные методы оценки качества цементобетонных покрытий // Дорожный строитель. – 2021. – № 7. – С. 22–28.
14. Борисова Е.А., Ковалев Д.И. Опыт применения высокопрочных цементобетонов в строительстве автомобильных дорог // Строительные технологии и материалы. – 2020. – № 11. – С. 65–73.
15. Гусейнов М.Р. Методы борьбы с пучинообразованием на автомобильных дорогах. Научные исследования в современном мире: опыт, проблемы и перспективы развития / Сборник научных статей по материалам XIV Международной научно-практической конференции (19 апреля 2024 г., г. Уфа) / – Уфа: Изд. НИЦ Вестник науки, 2024. – 619 с.

References:

1. Prospects for the use of thin-layer cement concrete road surfaces under conditions of increasing traffic loads: [strength of cement concrete road surfaces] / Aleksey Vladimirovich Busel, A.I. Smykovsky, Tatyana Anatolyevna Chistova // Problems of modern concrete and reinforced concrete: [collected papers]: in 2 parts / National Academy of Sciences of the Republic of Belarus, Union of Builders of Belarus, Institute BelNIIS; [editorial board: M.F. Markovsky (editor-in-chief) [and others]. – Minsk: Strinko, 2007. - Part 1: Concrete and reinforced concrete structures / editor-in-chief M.F. Markovsky. 2007:105–112.
2. Busel AV, Smykovsky AI, Chistova TA Concrete technologies. 2008; 2: 68–70.
3. Ivanov PN Modern technologies for the use of cement concrete in road construction // Construction materials. 2021; 8:15–22 (In Russ)

4. Gasanov T.G., Bat'manov E.Z., Guseinov M.R. Determination of the intensity of urban traffic in the conditions of the Republic of Daghestan. *Bulletin of the Moscow Automobile and Road State Technical University (MADI)*. 2014;3 (34):98–102. (In Russ)
5. Bat'manov E.Z., Gasanov T.G., Guseinov M.R. The influence of road conditions on the reduction of vehicle stability in the Republic of Dagestan. *Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Sciences*. 2016; 40(1):119–132. (In Russ)
6. Sidorov A.V. Study of the strength characteristics of cement concretes for road surfaces. *Roads and bridges*. 2020; 3:34–38. (In Russ)
7. Kuznetsov I.I. Innovative solutions in the construction of cement concrete roads. *Journal of construction technologies*. 2022; 1: 88–96. (In Russ)
8. Antonov B.A. The role of additives in improving the properties of cement concretes for road pavements . *Construction research*. 2019; 12: 45–50. (In Russ)
9. Petrova S.V. Environmental aspects of the use of cement concrete in road construction. *Ecology and construction*. 2021; 4: 72–77. (In Russ)
10. Grigoriev D.L., Naidenov E.I. Modern approaches to diagnostics of the condition of cement concrete roads. *Scientific works of the construction university*. 2020; 48: 102–108. (In Russ)
11. Fedorov A.S. Influence of climatic conditions on the durability of cement concrete pavements. *Construction and architecture*. 2023; 2: 110–115. (In Russ)
12. Smirnova N.M. Use of new technologies in the production of cement concrete for the construction of road surfaces . *New materials*. 2022; 6: 49–55. (In Russ)
13. Ilyina T.V. Modern methods for assessing the quality of cement concrete pavements. *Road builder*. 2021; 7: 22–28. (In Russ)
14. Borisova E.A., Kovalev D.I. Experience in using high-strength cement concrete in road construction. *Construction technologies and materials*. 2020; 11: 65–73. (In Russ)
15. Guseinov M.R. Methods for combating heaving on roads. Scientific research in the modern world: experience, problems and development prospects. Collection of scientific articles based on the materials of the XIV International Scientific and Practical Conference (April 19, 2024, Ufa) Ufa: Publ. NIC Vestnik Nauki, 2024:619. (In Russ)

Сведения об авторах:

Гусейнов Марат Рамизович, старший преподаватель кафедры транспортных сооружений и строительных материалов; Maratdgtu@mail.ru.

Селимханов Даниял Нажидинович, кандидат технических наук доцент кафедры автомобильного транспорта и дорожного хозяйства; daniyal860@mail.ru.

Information about authors:

Marat R. Guseynov, Senior Lecturer, Department of Transport Structures and Construction Materials ; Maratdgtu@mail.ru.

Daniyal N. Selimkhanov, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Department of Automobile Transport and Road Facilities; daniyal860@mail.ru.

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 24.09.2024.

Одобрена после рецензирования/Reviced 17.11.2024.

Принята в печать/Accepted for publication 20.01.2025.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
BUILDING AND ARCHITECTURE



УДК 691.53

DOI: 10.21822/2073-6185-2025-52-1-210-218

Оригинальная статья /Original article

**Анализ критериев стойкости модифицированных строительных растворов
при различных воздействиях**

Г.В. Несветаев¹, Г.Н. Хаджишалапов², И.А. Животкова²

¹Донской государственный технический университет,

¹344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1, Россия,

²Дагестанский государственный технический университет,

²367015, г. Махачкала, пр. Имама Шамиля, 70, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является анализ стойкости полученных из сухих строительных смесей строительных растворов по различным критериям после 100 циклов циклического замораживания, оттаивания и выдерживания в течение 120 сут по ГОСТ 24544-2020. **Метод.** Измерения по стандартным методикам параметров поровой структуры затвердевших растворов, пределов прочности при изгибе и сжатии, морозостойкости, скорости ультразвука, динамического модуля упругости, прочности сцепления со стандартным бетонным основанием и морозостойкости контактной зоны, деформаций усадки. **Результат.** Установлены закономерности изменения рассматриваемых показателей качества растворов при указанных воздействиях в зависимости от дозировки редиспергируемых полимерных порошков и вида минеральной добавки в составе комплексного модификатора. Показано, что длительное выдерживание в воздушно-сухих условиях может оказывать более негативное влияние на некоторые критерии стойкости в сравнении со 100 стандартными циклами замораживания и оттаивания. Выявлены зависимости и предложены уравнения, описывающие связь между критериями «изменение предела прочности при изгибе», «изменение прочности сцепления с основанием» и критерием «изменение предела прочности при сжатии» с учетом рецептурных факторов и вида минеральной добавки. Показана нецелесообразность использования таких критериев стойкости, как «изменение скорости ультразвука и динамического модуля упругости» при рассмотренных воздействиях. Предложен подход к количественному нормированию критерия «изменение предела прочности при изгибе». **Вывод.** При разработке составов некоторых сухих строительных смесей следует учитывать неоднозначное влияние рецептурных факторов на показатели, определяющие стойкость растворов при различных эксплуатационных воздействиях. Самым «жестким» критерием является изменение предела прочности при изгибе. Влияние комплексных модификаторов на критерии стойкости зависит от вида и дозировки добавок и может быть противоположным.

Ключевые слова: сухая строительная смесь, минеральные добавки, морозостойкость, редиспергируемые полимерные порошки, строительный раствор, шлам химводоочистки

Для цитирования: Г.В. Несветаев, Г.Н. Хаджишалапов, И.А. Животкова. Анализ критериев стойкости модифицированных строительных растворов при различных воздействиях. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025;52(1):210-218. DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-1-210-218

Analysis of resistance criteria of modified building mortars to various influences

G.V. Nesvetaev¹, G.N. Hadzhishalapov², I.A. Zhivotkova²

¹Don State Technical University,

¹1 Gagarin Square, Rostov-on-Don 344003, Russia,

²Daghestan State Technical University,

²70 I. Shamil Ave., Makhachkala 367015, Russia

Abstract. Objective. The article deals with the analysis of the resistibility of building mortars made of dry building mixtures according to various criteria after 100 cycles of freezing and thawing and aging for 120 days according to the Russian National Standard 24544-2020 **Method.** The investigation was based on standards to determine the parameters of the pore structure of hardened mortars, flexural and compressive strength, frost resistance, ultrasonic pulse velocity, dynamic modulus of elasticity, adhesion strength to a standard concrete base and frost resistance of the contact zone, and shrinkage deformations. **Result.** The relationships of changes in the investigated quality indicators of mortars under the specified impacts depending on the dosage of redispersible polymer powders and the type of mineral additive in the complex modifier are established. It is determined that long-term maturing to air-dry conditions can have more negative effect on some resistance criteria compared to 100 standard freeze-thaw cycles. The research reveals the relationships and offers the equations that describe the relationship between the criteria of "change in flexural strength", "change in adhesion strength to the concrete base" and the criterion of "change in compressive strength" taking into account the formulation factors and the type of mineral additive. The work points to inexpediency of usage such resistance criteria as "change in ultrasonic pulse velocity and dynamic modulus of elasticity" under the considered impacts. An approach to quantitative standardization of the criterion of "change in flexural strength" is proposed. **Conclusion.** When developing dry construction mixes, it is necessary to take into account the influence of recipe factors on the indicators that determine the resistance of solutions under various operational impacts. The most "rigid" criterion is the change in the bending strength limit. The influence of complex modifiers on the resistance criteria depends on the type and dosage of additives and can be opposite.

Keywords: dry building mixture, mineral additives, frost resistance, redispersible polymer powders, building mortars, chemical water treatment sludge

For citation: G.V. Nesvetaev, G.N. Hadzhishalapov, I.A. Zhivotkova. Effect of redispersible polymer powders on some properties of mortars with complex mineral additives. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2025;52(1):210-218. DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-1-210-218

Введение. Строительные растворы различного назначения, в т.ч. из сухих строительных смесей (ССС) на портландцементном вяжущем, массово используются при производстве общестроительных, отделочных и специальных работ, поскольку обеспечивают высокую технологичность и меньшую зависимость от погодных условий и логистики в сравнении с традиционными строительными растворами [1,2]. Кроме того, в связи с использованием в составе ССС различных минеральных добавок и наполнителей [3,4], в т.ч. во все возрастающих объемах, техногенного происхождения [5-7] с учетом роста производства и потребления ССС обеспечивается решение важной экологической задачи по утилизации промышленных отходов. При эксплуатации в зависимости от назначения строительные растворы подвергаются различным воздействиям [8-10], в связи с чем для обеспечения стойкости к эксплуатационным воздействиям должны удовлетворять установленным нормативными документами показателям качества, при этом в процессе разработки рецептур специалисты особое внимание уделяют оценке эффективности добавок для обеспечения требуемого уровня показателей [11-12].

Постановка задачи. Долговечность строительных конструкций зависит от стойкости материалов к эксплуатационным воздействиям. Среди основных показателей качества для, например, штукатурных и ремонтных составов для наружных работ, нормируются морозостойкость и усадочные деформации. ГОСТ 31357-2007 устанавливает марки по морозостойкости по критерию прочности при сжатии от F15 до F400, а по морозостойкости контактной зоны для всех смесей, кроме клеевых, от F_{к3}25 до F_{к3}100. ГОСТ Р 58277-2018 регламентирует методы испытаний ССС. Важным вопросом является регулирование усадки штукатурных растворов [13-15], особенно при производстве реставрационных ра-

бот [16]. Разработка рецептур ремонтных составов различного назначения также требует регулирования усадочных деформаций [17, 18]. Подробный анализ нормативных документов, регламентирующих оценку усадочных деформаций для растворов различного назначения из ССС, представлен в [19].

В составе ССС различного назначения для повышения удобообразуемости смесей и обеспечения требуемых свойств затвердевших растворов как правило присутствуют, наряду с водоудерживающей добавкой (ВУД), редиспергируемые полимерные порошки (РПП) и активные минеральные добавки АМД и (или) наполнители (МД) [20, 21]. В [19] показано, что строительные растворы с комплексной минеральной добавкой (КМД = шлам химвodoочистки + зола-уноса, либо опока, либо горелая порода) при соотношении ПЦ : КМД = 1 : 0,2 при средней влажности воздуха самого засушливого месяца в Ростове-на-Дону 47% не превышают 0,55 мм/м. В [22] представлены результаты исследований влияния указанных добавок на прочность сцепления со стандартным бетонным основанием полученных из ССС строительных растворов. В [23] представлены результаты исследований некоторых показателей, характеризующих полученных из ССС строительных растворов. Целью настоящего исследования является анализ стойкости полученных из ССС строительных растворов по различным критериям после 100 циклов циклического замораживания и оттаивания и выдерживания в течение 120 сут по ГОСТ 24544-2020.

Методы исследования. При реализации экспериментальных исследований применялись [9]:

- портландцемент ЦЕМ I 42,5 Н по ГОСТ 31108-2016 активностью 51,9 МПа;
- песок для строительных работ с модулем крупности 1,23 по ГОСТ 8736-2014;
- комплексная минеральная добавка - шлам (Ш) химвodoочистки в сочетании с золой-уноса (З) Новочеркасской ГРЭС либо опоки (О) при соотношении Ш:З (либо О) = 1:1, которая, поскольку методом РФА в составе новообразований выявлены, в т.ч., гидрокарбоалюминаты кальция, может рассматриваться как активная минеральная (АМД);
- добавка водоудерживающая «Mecellose 23701» в дозировке 0,3% от массы минеральной части смеси;
- редиспергируемый полимерный порошок РПП Vinavil E06PA от 1 до 3% от массы минеральной части смеси.

Состав смеси Ц : АМД : П : В = 1 : 0,2 (0,1+0,1) : 1,3 : 0,4. Параметры поровой структуры затвердевших растворов определены по ГОСТ 12730.0-4. Пределы прочности при изгибе и сжатии определены по ГОСТ 30744, п.8.2, образцы 40x40x160 мм. Морозостойкость определялась по ГОСТ 31356-2007. Морозостойкость определена в соответствии с ГОСТ Р 58277-2018, образцы призмы 40x40x160 мм. Измерение скорости ультразвука, динамического модуля упругости выполнено на образцах 40x40x160 мм с учетом положений ГОСТ 10060-2012.

Определение динамического модуля упругости произведено по данным о скорости ультразвука и средней плотности исследованных строительных растворов по методике [24]. Прочность сцепления со стандартным бетонным основанием и морозостойкость контактной зоны определены по ГОСТ 31356. Определение деформаций усадки произведено по ГОСТ 24544-2020 при относительной влажности воздуха 55-65%. В качестве критериев морозостойкости и стойкости после выдерживания в течение 120 сут по ГОСТ 24544-2020 рассматривались:

- изменение предела прочности при сжатии (ГОСТ Р 58277-2018);
- изменение динамического модуля упругости (ГОСТ 10060-2012, Приложение А);
- изменение скорости ультразвука (ГОСТ 10060-2012, Приложение А);
- изменение предела прочности при изгибе (стандартами не регламентируется);
- изменение прочности сцепления со стандартным бетонным основанием (ГОСТ 31356).

На рис. 1 представлена зависимость изменения предела прочности при сжатии (критерий стойкости «предел прочности при сжатии» по ГОСТ Р 58277-2018) от дозировки РПП после 100 циклов замораживания и оттаивания (1 вид воздействий) и после выдерживания 120 сут. по ГОСТ 24544-2020 (2 вид воздействий).

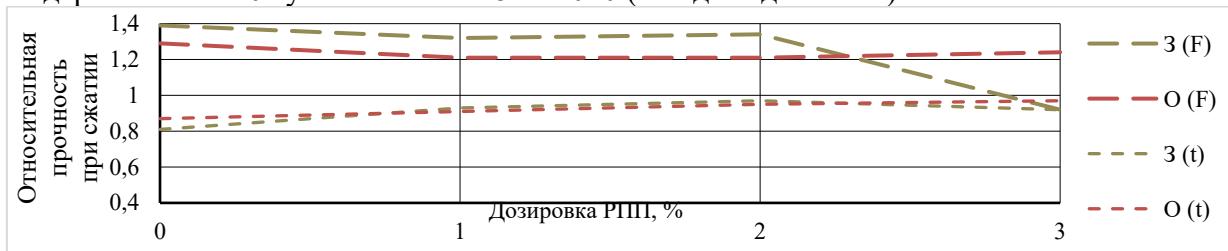


Рис. 1 - Изменение предела прочности при сжатии в различных условиях выдерживания в зависимости от дозировки РПП

Fig. 1 - Change in compressive strength under different conditions of aging depending on the dosage of RPP

Где, 3, О – соответственно в составе АМД зола-уноса, опока. (F) – после 100 циклов замораживания и оттаивания по ГОСТ Р 58277-2018. (t) – после 120 сут выдерживания по ГОСТ 24544-202.

На рис. 2 представлена зависимость изменения предела прочности при изгибе (критерий стойкости «предел прочности при изгибе») от дозировки РПП после 100 циклов замораживания и оттаивания (1 вид воздействий) и после выдерживания 120 сут. по ГОСТ 24544-2020 (2 вид воздействий).

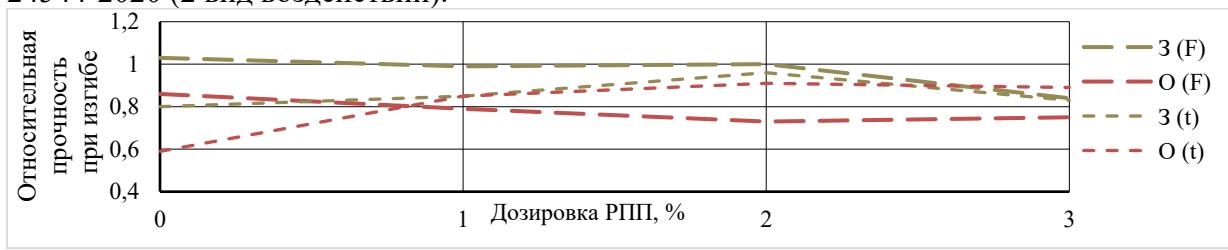


Рис. 2 - Изменение предела прочности при изгибе в различных условиях выдерживания в зависимости от дозировки РПП

Fig. 2 - Change in the flexural strength under different conditions of curing depending on the dosage of RPP

Где, 3, О – соответственно в составе АМД зола-уноса, опока. (F) – после 100 циклов замораживания и оттаивания по ГОСТ Р 58277-2018. (t) – после 120 сут выдерживания по ГОСТ 24544-2020.

На рис. 3 представлена зависимость изменения прочности сцепления со стандартным бетонным основанием (критерий стойкости «прочность сцепления») от дозировки РПП после 100 циклов замораживания и оттаивания (1 вид воздействий) и после выдерживания 120 сут. по ГОСТ 24544-2020 (2 вид воздействий).

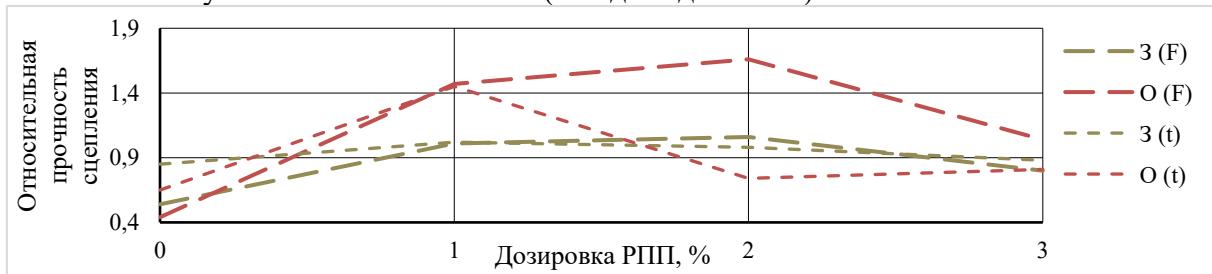


Рис. 3 - Изменение предела прочности сцепления со стандартным бетонным основанием в различных условиях выдерживания в зависимости от дозировки РПП

Fig. 3 - Change in the adhesion strength limit with a standard concrete base under various curing conditions depending on the dosage of RPP

Где, 3, О – соответственно в составе АМД зола-уноса, опока. (F) – после 100 циклов замораживания и оттаивания по ГОСТ Р 58277-2018. (t) – после 120 сут выдерживания по ГОСТ 24544-2020.

На рис. 4 представлена зависимость изменения модуля упругости (критерий стойкости «изменение модуля упругости») от дозировки РПП после 100 циклов заморажива-

ния и оттаивания (1 вид воздействий) и после выдерживания 120 сут. по ГОСТ 24544-2020 (2 вид воздействий).

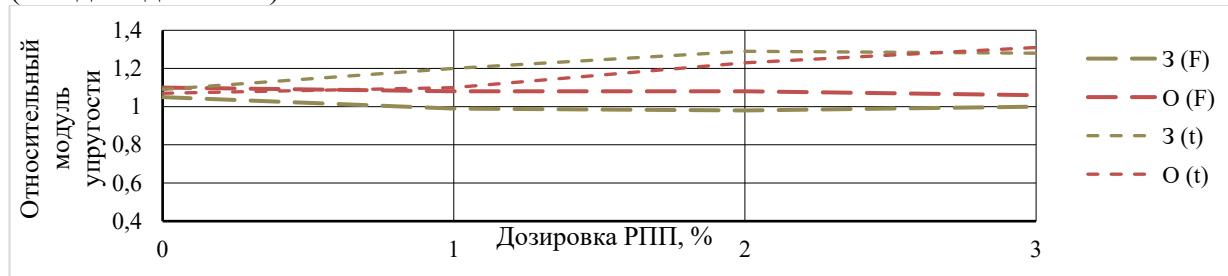


Рис. 4 - Изменение модуля упругости в различных условиях выдерживания в зависимости от дозировки РПП

Fig. 4 - Change in elastic modulus under different aging conditions depending on the dosage of RPP

Где, З, О – соответственно в составе АМД зола-уноса, опока. (F) – после 100 циклов замораживания и оттаивания по ГОСТ Р 58277-2018. (t) – после 120 сут выдерживания по ГОСТ 24544-2020.

На рис. 5 представлена зависимость изменения скорости ультразвука (критерий стойкости «изменение скорости ультразвука») от дозировки РПП после 100 циклов замораживания и оттаивания (1 вид воздействий) и после выдерживания 120 сут. по ГОСТ 24544-2020 (2 вид воздействий).

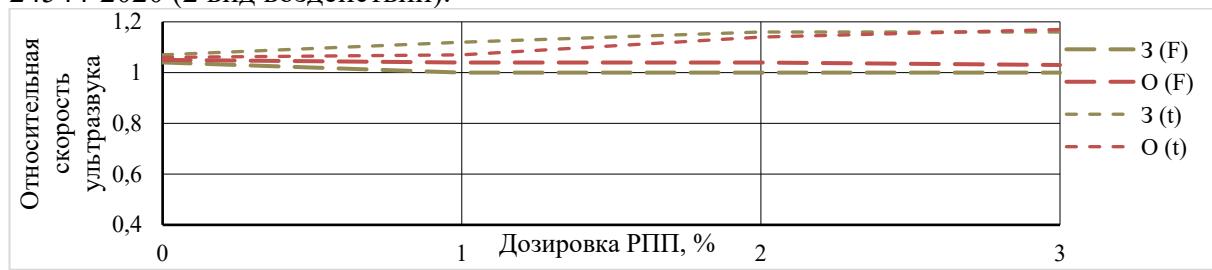


Рис. 5 - Изменение скорости ультразвука в различных условиях выдерживания в зависимости от дозировки РПП

Fig. 5 - Change in ultrasound speed under different conditions of exposure depending on the dosage of RPP

Где, З, О – соответственно в составе АМД зола-уноса, опока. (F) – после 100 циклов замораживания и оттаивания по ГОСТ Р 58277-2018. (t) – после 120 сут выдерживания по ГОСТ 24544-2020

На рис. 6 представлена зависимость критерия «изменение предела прочности при изгибе» R_f от критерия «изменение предела прочности при сжатии» R для 1 и 2 вида воздействий.

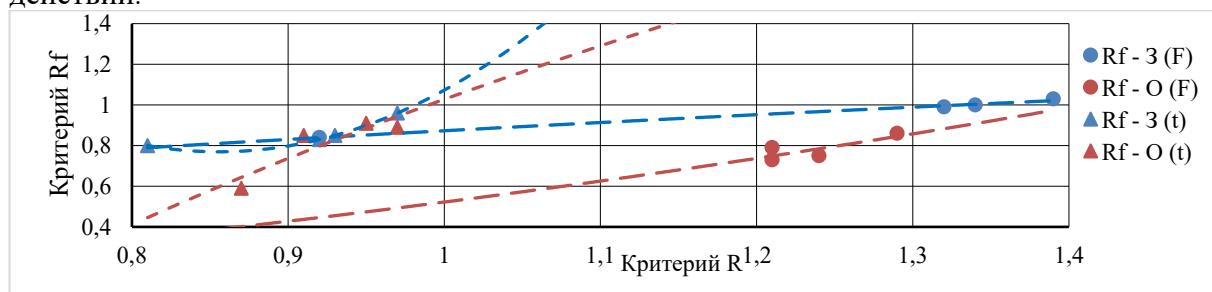


Рис. 6 - Зависимость критерия «предел прочности при изгибе» от критерия «предел прочности при сжатии» после 1 и 2 вида воздействий

Fig. 6 - Dependence of the criterion "ultimate bending strength" on the criterion "ultimate compressive strength" after 1 and 2 types of impacts

Где, З, О – зола, опока; (F), (t) – 100 циклов замораживания и оттаивания, 120 сут по ГОСТ 24544-2020.

Зависимость критерия «предел прочности при изгибе» $k(R_f)$ от критерия «предел прочности при сжатии» $k(R)$ описывается представленными в табл. 1 уравнениями.

Таблица 1. Уравнения зависимости $k(R_F) = fk(R)$

Table 2. Dependency equations $k(R_F) = fk(R)$

Воздействие Impact	Уравнение Equation		R^2***	
	Зола (З) Ash	Опока (О) Flask	З	О
1*	$k(R_F) = 0,87R^{0,48}$	$k(R_F) = 0,52R^{1,9}$	0,99	0,65
2**	$k(R_F) = 11,4 - 24,9R + 14,6R^2$	$k(R_F) = 2,76 \ln(R) + 1,03$	1,0	0,8

Примечания: * - 100 циклов замораживания и оттаивания; ** - 120 сут по ГОСТ 24544-2020; *** - показатель достоверности аппроксимации

На рис.7 представлена зависимость критерия «изменение прочности сцепления» $k(A)$ от критерия «изменение предела прочности при сжатии» $k(R)$ для 1 и 2 вида воздействий.

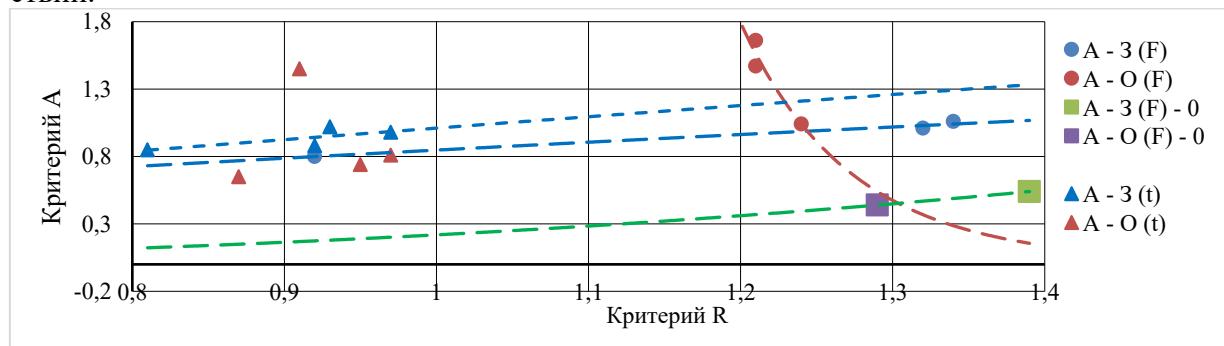


Рис. 7 - Зависимость критерия «изменение прочности сцепления» A от критерия «изменение предела прочности при сжатии» R для 1 и 2 вида воздействий

Fig. 7 - Dependence of the criterion "change in adhesion strength" A on the criterion "change in compressive strength" R for types 1 and 2 of impact

Где, З, О – зола, опока; (F), (t) – 100 циклов замораживания и оттаивания, 120 сут по ГОСТ 24544-2020.

Зависимость критерия «предел прочность сцепления» от критерия «предел прочности при сжатии» описывается представленными в табл. 2 уравнениями:

$$k(A) = a \cdot k(R)^b, \quad (1)$$

параметры которых представлены в табл.2.

Таблица 2. Параметры уравнений ф. (1)
 Table 2. Parameters of equations f. (1)

Воздействие Impact	Параметры уравнений ф. (1) Parameters of equations			R^2****		
	Зола (З) Ash	Опока (О) Flask	Эталон*** Reference	З	О	Э
1*	0,85 (0,7)****	37,1 (-16,6)****	0,22 (2,74)****	0,98	0,91	1,0
2**	1,01 (0,84)****	-	-	0,55	-	-

Примечание: * - 100 циклов замораживания и оттаивания; ** - 120 сут по ГОСТ 24544-2020; *** - эталон без РПП; **** a (b); **** - показатель достоверности аппроксимации

Обсуждение результатов. Изменение скорости ультразвука и динамического модуля упругости при рассмотренных воздействиях малоинформативно, в связи с чем целесообразность применения критериев стойкости, основанных на изменении указанных показателей, для оценки, например, морозостойкости модифицированных строительных растворов представляется весьма дискуссионной.

При выдерживании в течение 120 сут в условиях по ГОСТ 24544-2020 имело место снижение предела прочности при сжатии до 20 %, причем с ростом дозировки РПП снижение предела прочности ниже относительно бездобавочного эталона, т.е. наличие РПП в составе раствора положительно влияет на стойкость по критерию «прочность при сжатии» в рассматриваемых условиях. После 100 циклов замораживания и оттаивания имело место значительное повышение предела прочности при сжатии, причем при дозировке РПП до 2% эффект мало зависит от вида МД (зола или опока), при 3% РПП зафиксировано снижение прочности в растворах с золой. Поскольку по ГОСТ Р 58277-2018 допустимый уровень снижения прочности при сжатии составляет 20%, можно констатировать, что по кри-

терио прочности при сжатии исследованные растворы выдержали испытания на базе 100 циклов. Если применить этот же критерий для выдерживания в течение 120 сут по ГОСТ 24544-2020, то и в этом случае снижения прочности ниже уровня 0,8 не зафиксировано.

При выдерживании в течение 120 сут в условиях по ГОСТ 24544-2020 имело место снижение предела прочности при изгибе в растворах без РПП до 20 % в составах с золой и до 40% в составах с опокой. В составах с РПП 1% и более снижение предела прочности при изгибе составило менее 20%. После 100 циклов замораживания и оттаивания имело место снижение предела прочности при изгибе более 20% в составах с опокой. В составах с золой коэффициент стойкости $R_{f,F}/R_{f,0}$ при дозировке РПП до 2% включительно составил не менее 1, с повышением дозировки РПП зафиксировано снижение коэффициента стойкости до 0,85. Стандарты не регламентируют показатели по критерию «предел прочности при изгибе». Если принять по аналогии с прочностью при сжатии допустимый уровень снижения 20%, то можно констатировать, что при 2 виде воздействий составы с РПП соответствуют требованию, а при циклическом замораживании и оттаивании составы с опокой и РПП не прошли испытания. Если использовать зависимость:

$$R_f = k \cdot R^{0.74}, \quad (2)$$

то при допустимом снижении предела прочности при сжатии R до уровня 0,8 снижение предела прочности при изгибе R_f произойдет до уровня 0,85. Это не повлияет на сделанный ранее вывод о стойкости по критерию «изменение прочности при изгибе».

При выдерживании в течение 120 сут в условиях по ГОСТ 24544-2020 имело место снижение прочности сцепления со стандартным бетонным основанием в растворах без РПП до 15 % в составах с золой и до 35% в составах с опокой. В составах с золой и РПП до 2%, а в составах с опокой до 1,5% не зафиксировано снижение прочности сцепления. После 100 циклов замораживания и оттаивания в составах с золой и РПП до 2%, а в составах с опокой до 3% не зафиксировано снижение прочности сцепления. По ГОСТ Р 58277-2018 допустимое снижение прочности сцепления с основанием составляет 20%, а по ГОСТР 56387-2018 для смесей классов С1 и С2 снижение прочности сцепления после циклического замораживания и оттаивания не допускается.

Между критериями «снижение прочности при изгибе» и «снижение прочности при сжатии» для обоих видов воздействий для составов с золой имеет место тесная корреляция. Для составов с опокой корреляция невысокая, особенно при циклическом замораживании и оттаивании. После воздействия 1 вида между критериями «снижение прочности сцепления» и «снижение прочности при сжатии» для составов с золой, опокой и составов без РПП имеет место тесная корреляция, при этом если у составов с золой с ростом показателя стойкости по прочности при сжатии растет и показатель стойкости по прочности сцепления, то у составов с опокой имеет место обратная зависимость. Также имеет место невысокая корреляция для составов с золой после воздействия 2 вида, а для составов с опокой корреляция отсутствует.

Вывод. При разработке составов некоторых штукатурных, клеевых и «ремонтных» растворов следует учитывать влияние рецептурных факторов на показатели, определяющие их стойкость при эксплуатационных воздействиях, в частности, морозостойкость, усадочные деформации и морозостойкость контактной зоны.

Влияние комплексных модификаторов, содержащих различные полимерные и минеральные добавки, на указанные свойства зависит от вида и дозировки добавок и вида воздействий. Использование таких критериев стойкости, как «изменение скорости ультразвука и динамического модуля упругости», нецелесообразно. Связь между критериями стойкости, как «изменение пределов прочности при сжатии, изгибе и прочности сцепления со стандартным бетонным основанием» зависит как от вида воздействий, так и от особенностей рецептуры. Самым «жестким» среди названных критериев является «изменение предела прочности при изгибе». Исследования в области нормирования количественных значений критериев целесообразно продолжить.

Библиографический список:

1. Панченко А.И. Сухие смеси в России: особенности производства и применения // Строительные материалы. 2002. № 5. С. 19-22.
2. Загороднюк Л.Х., Гридчин А.М., Лесовик В.С. Тенденции развития производства сухих строительных смесей в России // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2016. № 12. С. 6-14. DOI: 10.12737/22638.
3. Кузьмина В.П. Защита и ремонт железобетонных сооружений // Сухие строительные смеси. 2017. №2. С.23-25.
4. Шляхова Е.А., Шляхов М.А. Влияние вида минеральной добавки микронаполнителя на свойства мелкозернистого бетона// Инженерный вестник Дона. 2015. № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2015/3394.
5. Каклюгин А.В., Боброва В.В., Валов М.П., Щербакова В.С. Использование шлама химводоочистки теплоэлектростанций в производстве строительных материалов и изделий // Молодой исследователь Дона. 2020. № 4(25). С. 28-33.
6. Prokopski G., Huts A., Marchuk V. Granite dust as a mineral component of a dry cement mortar mixtures // Archives of Civil Engineering. 2020. Vol. 66. No 3. P. 81-96. DOI: 10.24425/ace.2020.134385.
7. Перцев В.Т., Халилбеков Я.З., Леденев А.А., Перова Н.С. Состав и технология комплексных добавок для бетона на основе промышленных отходов // Цемент и его применение. 2019. № 3. С. 98-101.
8. Оноприенко Н.Н., Сальникова О.Н. К вопросу разработки отечественных реставрационных материалов для памятников архитектуры // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2023. № 3. С. 19-33. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-3-19-33.
9. Манушина А.С., Урбанов А.В., Ахметжанов А.М. и др. Влияние минеральных и полимерных добавок на свойства плиточного клея // Сухие строительные смеси. 2016. № 2. С. 17-20.
10. Белых С.А., Кудяков А.И., Чикичев А.А. Сухая строительная смесь с повышенной адгезионной прочностью для отделки кирпичных поверхностей во влажных помещениях // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2017. № 1(60). С. 122-133.
11. URL: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n1y2012/737>. Налимова, А.В. Влияние комплексной полимерной добавки на прочность и усадочные деформации цементного камня//Инженерный вестник Дона. 2012. № 1(19).
12. Нарин С.Ю., Кронштатов А.П. Ремонтные составы CONCOLIT BARS для укрепления и восстановления бетонных конструкций и сооружений. Специальные цементы для бетонов // Сухие строительные смеси. 2011. № 6. С. 13-15.
13. Завадская, Л.В. Многокомпонентные цементы с максимальным содержанием минеральных добавок// Труды Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета (Сибстрин). 2023.Т. 26, № 3(89). С. 100-107. DOI 10.32683/1815-5987-2023-26-89-3-100-107.
14. Пухаренко Ю.В., Харитонов А.М., Шангина Н.Н., Сафонова Т.Ю. Реставрация исторических объектов с применением современных сухих строительных смесей//Вестник гражданских инженеров. 2011. № 1(26). С.98-103.
15. Шангина, Н.Н., Харитонов А.М. Особенности производства и применения сухих строительных смесей для реставрации памятников архитектуры // Сухие строительные смеси. 2011. № 4. С. 16-19.
16. Логанина В.И. Сухие строительные смеси для реставрации зданий исторической застройки // Региональная архитектура и строительство. 2015. № 3 (24). С. 34-42.
17. Кузьмина В.П. Защита и ремонт железобетонных сооружений // Сухие строительные смеси. 2017. №2. С.23-25.
18. Коровкин М.О., Короткова А.А., Ерошкина Н.А. Ремонтные сухие строительные смеси для восстановления геометрических характеристик железобетонных конструкций // Образование и наука в современном мире. Инновации. 2020. № 5 (30). С. 122-128.
19. <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2024/9366>. Несветаев, Г.В., Хаджишалапов Г.Н., Животкова И.А. Влияние некоторых минеральных добавок на деформации усадки строительных растворов // Инженерный вестник Дона. № 7(2024)
20. Лесовик В.С., Загороднюк Л.Х., Беликов Д.А. и др. Эффективные сухие смеси для ремонтных и восстановительных работ // Строительные материалы. 2014. № 7. С. 82-85.
21. <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2024/9200>. Несветаев Г.В., Животкова И.А. Влияние некоторых минеральных добавок на свойства мелкозернистых бетонов и строительных растворов//Инженерный вестник Дона, № 5 (2024)
22. Г.В. Несветаев, Г.Н. Хаджишалапов, И.А. Животкова. Влияние редиспергируемых полимерных порошков на некоторые свойства строительных растворов с комплексными минеральными добавками. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2024;51(4):217-225. DOI:10.2182/20736185-2024-51-4-217-225.
23. <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2024/9569>. Несветаев, Г. В., Хаджишалапов Г. Н., Животкова И. А. Морозостойкость строительных растворов из сухих строительных смесей с модификаторами // Инженерный вестник Дона. № 10 (2024)
24. МИ 11-87. Методические указания. ГСИ. Прочностные и деформационные характеристики бетонов при одновременном кратковременном статическом сжатии и растяжении. Методика выполнения измерений. М.: Издательство стандартов, 1989. 89 с.

References:

1. Panchenko A.I. Dry mixes in Russia: features of production and application. *Construction materials*. 2002; 5:19-22. (In Russ)
2. Zagorodnyuk L.Kh., Gridchin A.M., Lesovik V.S. Trends in the development of dry construction mixes production in Russia. *Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2016;12:6-14. DOI: 10.12737/22638. (In Russ)

3. Kuzmina V.P. Protection and repair of reinforced concrete structures. *Dry construction mixes*. 2017;2:23-25. (In Russ)
4. Shlyakhova E.A., Shlyakhov M.A. Influence of the type of mineral additive microfiller on the properties of fine-grained concrete. *Engineering Bulletin of the Don*. 2015;4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2015/3394. (In Russ)
5. Kaklyugin A.V., Bobrova V.V., Valov M.P., Shcherbakova V.S. Use of sludge from chemical water treatment of thermal power plants in the production of building materials and products. *Young researcher of the Don*. 2020;4 (25):28-33. (In Russ)
6. Prokopski G., Huts A., Marchuk V. Granite dust as a mineral component of a dry cement mortar mixtures. *Archives of Civil Engineering*. 2020; 66(3):81-96. DOI: 10.24425/ace.2020.134385.
7. Pertsev V.T., Khalilbekov Ya.Z., Ledenev A.A., Perova N.S. Composition and technology of complex additives for concrete based on industrial waste. *Cement and its application*. 2019;3:98-101. (In Russ)
8. Onoprienko N.N., Salnikova O.N. On the issue of developing domestic restoration materials for architectural monuments. *Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2023;3:19-33. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-3-19-33. (In Russ)
9. Manushina A.S., Urbanov A.V., Akhmetzhanov A.M., et al. Influence of mineral and polymer additives on the properties of tile adhesive. *Dry building mixtures*. 2016; 2:17-20. (In Russ)
10. Belykh S.A., Kudyakov A.I., Chikichev A.A. Dry building mixture with increased adhesive strength for finishing brick surfaces in wet rooms. *Bulletin of Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering*. 2017;1(60): 122-133. (In Russ)
11. URL: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n1y2012/737>. Nalimova, A.V. Influence of complex polymer additive on the strength and shrinkage deformations of cement stone. *Engineering Bulletin of the Don*. 2012;1(19). (In Russ)
12. Narin S.Yu., Kronshtatov A.P. CONCOLIT BARS repair mortars for strengthening and restoring concrete structures and buildings. Special cements for concrete. *Dry construction mixtures*. 2011; 6:13-15. (In Russ)
13. Zavadskaya, L.V. Multicomponent cements with maximum content of mineral additives. *Transactions of the Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin)*. 2023;26(3) (89):100-107. DOI 10.32683/1815-5987-2023-26-89-3-100-107. (In Russ)
14. Pukharenko Yu.V., Kharitonov A.M., Shangina N.N., Safonova T.Yu. Restoration of historical objects using modern dry building mixes. *Bulletin of civil engineers*. 2011;1 (26): 98-103. (In Russ)
15. Shangina, N.N., Kharitonov A.M. Features of production and application of dry building mixes for restoration of architectural monuments. *Dry building mixes*. 2011; 4:16-19. (In Russ)
16. Loganina V.I. Dry building mixes for restoration of historical buildings. *Regional architecture and construction*. 2015; 3 (24):34-42. (In Russ)
17. Kuzmina V.P. Protection and repair of reinforced concrete structures. *Dry building mixes*. 2017; 2: 23-25.
18. Korovkin M.O., Korotkova A.A., Eroshkina N.A. Repair dry building mixes for restoration of geometric characteristics of reinforced concrete structures. *Education and science in the modern world. Innovations*. 2020;5 (30)122-128. (In Russ)
19. <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2024/9366>. Nesvetaev, G.V., Hadzhishalapov G.N., Zhivotkova I.A. Influence of some mineral additives on shrinkage deformations of building mortars. *Engineering Bulletin of the Don*. 2024;7 (In Russ)
20. Lesovik V. S., Zagorodnyuk L. Kh., Belikov D. A. et al. Effective dry mixes for repair and restoration work. *Construction materials*. 2014;7:82-85. (In Russ)
21. <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2024/9200>. Nesvetaev G.V., Zhivotkova I.A. Influence of Some Mineral Additives on the Properties of Fine-Grained Concretes and Mortars. *Engineering Bulletin of the Don*, 2024;5 (In Russ)
22. G.V. Nesvetaev, G.N. Khadzhishalapov, I.A. Zhivotkova. Influence of Redispersible Polymer Powders on Some Properties of Mortars with Complex Mineral Additives. *Herald of the Dagestan State Technical University. Technical Sciences*. 2024;51(4):217-225. DOI:10.21822/20736185-2024-51-4-217-225. (In Russ)
23. Nesvetaev, G.V., Hadzhishalapov G.N., Zhivotkova I.A. Frost resistance of building mortars from dry building mixes with modifiers. *Engineering Bulletin of the Don*. 2024;10 <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2024/9569> (In Russ)
24. MI 11-87. Methodical instructions. GSI. Strength and deformation characteristics of concrete under uniaxial short-term static compression and tension. Methodology for performing measurements. Moscow: Publishing House of Standards, 1989:89. (In Russ)

Сведения об авторах:

Несветаев Григорий Васильевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Технология строительного производства»; nesgrin@yandex.ru

Хаджишалапов Гаджимагомед Нурмагомедович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология и организация строительного производства»; yarus-x@mail.ru

Животкова Ирина Александровна, аспирант кафедры «Технология и организация строительного производства»; ira_kosheleva@list.ru

Information about the authors:

Grigory V. Nesvetaev, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Department of Construction Production Technology; nesgrin@yandex.ru

N. Kh. Gadzhimogomed, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department of Technology and Organization of Construction Production; yarus-x@mail.ru

Irina A. Zhivotkova, Postgraduate Student, Department of Construction Production Technology and Organization; ira_kosheleva@list.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 20.11.2024.

Одобрена после рецензирования/Revised 21.12.2024.

Принята в печать/Accepted for publication 15.01.2025.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 699.86

DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-1-219-226

Оригинальная статья /Original article



Тепловизионное обследование общеобразовательных учреждений в г. Москве

А.А. Фролова¹, Д.Ф. Карпов², Х.М. Вафаева³, З.А. Гаевская³

¹Московский государственный строительный университет,

¹129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 25, Россия,

²Вологодский государственный университет,

²160000, г. Вологда, ул. Ленина, 15, Россия,

³Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,

³195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29 литера Б, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является определение причин формирования некомфортного микроклимата в помещениях школы на 1 этаже (1 вариант), а также обследование фасада школы (2 вариант) при помощи инструментов тепловизионной съемки и приборов измерения температуры внутри здания. **Метод.** Для проведения исследования использовались следующие методы: оценка конструктивной схемы здания; внешний визуальный осмотр наружных ограждений зданий; тепловизионное обследование с помощью тепловизоров Testo 868 и Testo 870-1; дополнительные измерения температуры внутреннего воздуха и регистрация метеоусловий многофункциональным измерительным прибором Testo 435 с щупом температуры воздуха; обработка полученных термограмм. **Результат.** Получены термограммы внутри проблемных помещений в первой школе и по фасадам зданий во второй школе, а также значения температуры внутреннего и наружного воздуха. **Вывод.** При проведении исследования с помощью тепловизионной съемки были выявлены дефекты фасада школы по 2 варианту и основные причины некомфортного пребывания людей на 1 этаже школы по варианту 1. Выявлена недостаточная тепловая защита зданий в связи с несовершенством утепления ограждающих конструкций, некорректными применением входных дверей (не утепленные, без тамбура), что влечет за собой возможную конденсацию влаги на внутренней поверхности наружной стены и двери, а также некомфортные условия микроклимата в помещениях. Выявлено, что солнечная погода в холодное время года влияет на проведение тепловизионной съемки и не дает провести замеры корректно, даже с учетом, что количество тепловой энергии от солнечной радиации в это время года незначительно.

Ключевые слова: тепловизионное обследование, комфортность тепловой обстановки, термограмма, параметры внутреннего микроклимата, тепловая защита здания

Для цитирования: А.А. Фролова, Д.Ф. Карпов, Х.М. Вафаева, З.А. Гаевская. Тепловизионное обследование общеобразовательных учреждений в г. Москве. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025;52(1):219-226. DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-1-219-226

Thermal imaging survey of general education institutions in Moscow

А.А. Frolova¹, D.F. Karpov², Kh.M. Vafaeva³, Z.A. Gaevskaya³

¹Moscow State University of Civil Engineering,

¹Yaroslavskoe highway, 26, Moscow, 129337, Russia,

²Vologda State University,

²15 Lenin St., Vologda, 160000, Russia,

³Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University,

³29 letter B Polytechnique St., Saint-Petersburg, 195251, Russia

Abstract. Objective. The aim of the study is to determine the causes of the formation of an uncomfortable microclimate in the school premises on the 1st floor (option 1), as well as to examine the school facade (option 2) using thermal imaging and temperature measuring devices inside the building. **Method.** Assessment of the building's structural design; external visual inspection of the building's external enclosures; thermal imaging survey using Testo 868 and Testo 870-1 thermal imagers; additional measurements of indoor air temperature and recording of meteorological conditions using a Testo 435 multifunctional measuring device with an air temperature probe; processing of the obtained thermograms. **Result.** As a result of the measurements, thermograms were obtained inside the problematic rooms in the first school and on the facades of the buildings in the second school, as well as the values of the internal and external air temperature. **Conclusion.** Thermal imaging revealed defects in the school facade according to option 2 and reasons for the uncomfortable stay of people on the 1st floor of the school according to option 1. Insufficient thermal protection of buildings was revealed due to poor insulation of enclosing structures, uninsulated entrance doors without a vestibule, which leads to condensation of moisture on the inner surface of the outer wall and door, as well as uncomfortable microclimate conditions in the premises. It was revealed that sunny weather in the cold season affects thermal imaging and does not allow measurements to be taken correctly, even taking into account that the amount of thermal energy from solar radiation at this time of year is insignificant.

Keywords: thermal imaging survey, thermal comfort, thermogram, indoor microclimate parameters, building thermal protection

For citation: A.A. Frolova, D.F. Karpov, Kh.M. Vafaeva, Z.A. Gaevskaya. Thermal imaging survey of general education institutions in Moscow. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2025;52(1):219-226. DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-1-219-226

Введение. Весьма часто теплотехнические свойства наружных ограждающих конструкций ухудшаются [1] и приводят к перерасходу тепловой энергии для поддержания параметров микроклимата помещений [2, 3], а также происходит ухудшений комфорта пребывания людей в таких помещениях [4]. Для того, чтобы можно было выявить дефектные области таких конструкций и своевременно их устранить, требуется проведение тепловизионной съемки с помощью специального оборудования. Такие обследования проводятся часто для разных типов зданий и сооружений [5-18] с подготовкой отчета и выдачей рекомендаций по устранению выявленных дефектов и несоответствий нормативным документам.

Особенности такого обследования регламентируются нормативным документом ГОСТ Р 54852-2024 [19]. Основным требованием является наличие устоявшейся наружной температуры ниже -5°C . Можно отметить, что развитие и применение натурных исследований наружных ограждений зданий является актуальной задачей [20-26].

Постановка задачи. Целью исследования является определение причин формирования некомфортного микроклимата в помещениях школ на 1 этаже (1 вариант), а также обследование фасада школы (2 вариант) при помощи инструментов тепловизионной съемки и приборов измерения температуры внутри здания. Для достижения этой цели требуется провести обследование школ и оценить факторы, влияющие на некомфортные теплоощущения людей в зданиях.

Объектом исследования являются наружные ограждающие конструкции общеобразовательных учреждений в г. Москве. Предмет исследования – температура, формирующаяся на поверхности наружных стен, входных дверей, и параметры внутреннего микроклимата.

Методы исследования. Для проведения исследования использовались следующие методы: оценка конструктивной схемы здания; внешний визуальный осмотр наружных ограждений зданий; тепловизионное обследование с помощью тепловизоров Testo 868 и Testo 870-1; дополнительные измерения температуры внутреннего воздуха и регистра-

ция метеоусловий многофункциональным измерительным прибором Testo 435 с щупом температуры воздуха; обработка полученных термограмм.

В ходе исследования были проанализированы два типа школ: первая школа (1 вариант) с наружными ограждающими конструкциями блочного типа, вторая школа (2 вариант) - стены из минераловатных плит на клее с креплением дюбелями с лесов при толщине утеплителя 100 мм (по кирпичу и бетону); защитно-декоративная штукатурка фасадов по теплоизоляции систем типа «Ремтеко-Термомакс» и «Ремтеко-Термомакс Е» с подготовкой поверхности: окраска фасадов по защитно-декоративной штукатурке систем типа «Ремтеко-Термомакс» и «Ремтеко-Термомакс Е» акриловой краской «Maestro».

Измерения проводились в первом случае тепловизором Testo 868, во втором - Testo 870-1. Testo 868 подключается к мобильному устройству по беспроводной сети и с помощью специального программного комплекса позволяет составлять и пересыпать отчеты с результатами измерений прямо на месте замера, сохранять их, а также использовать смартфон или планшет как второй дисплей или пульт управления тепловизором.

Применяется для локализации утечек, выявления перегревающихся соединений, точное обнаружение тепловых мостиков или дефектов ограждающих конструкций. Testo 870-1 может осуществлять обнаружение утечек в системах напольного отопления, локализовать мостики холода или визуализировать соединения с аномально высоким нагревом.

В исследовании использованы комплексные методы, включая оценку конструктивной схемы зданий, внешний визуальный осмотр ограждающих конструкций и тепловизионное обследование с использованием приборов Testo 868 и Testo 870-1. Это позволило получить подробную информацию о тепловой эффективности объектов. Основное внимание уделено выявлению тепловых мостиков, утечек тепла и дефектов ограждающих конструкций, а также измерению температуры внутреннего воздуха и метеоусловий с применением многофункциональных приборов. В ходе обследования проанализированы два типа школ с различными конструктивными особенностями наружных ограждений. Такой сравнительный подход обеспечил возможность сопоставления эффективности применяемых теплоизоляционных материалов и систем фасадной отделки.

Обсуждение результатов. В результате проведенных замеров были получены термограммы внутри проблемных помещений в первой школе и по фасадам зданий во второй школе, а также значения температуры внутреннего и наружного воздуха.

На рис. 1 -3 представлены термограммы первой школы, соответствующие измерениям на первом этаже в помещениях, где не комфортно пребывание для учителей и учеников. Рассмотрим только проблемные зоны, которые обнаружились в результате натурального исследования. На рис. 1 в помещении раздевалки в зоне стыка оконного блока и наружной стены выявлены наибольшие тепловые потери, что подтверждается температурой в точке С равной 8,4 °C при наружной температуре -10 °C и внутренней температуре воздуха 18 °C.

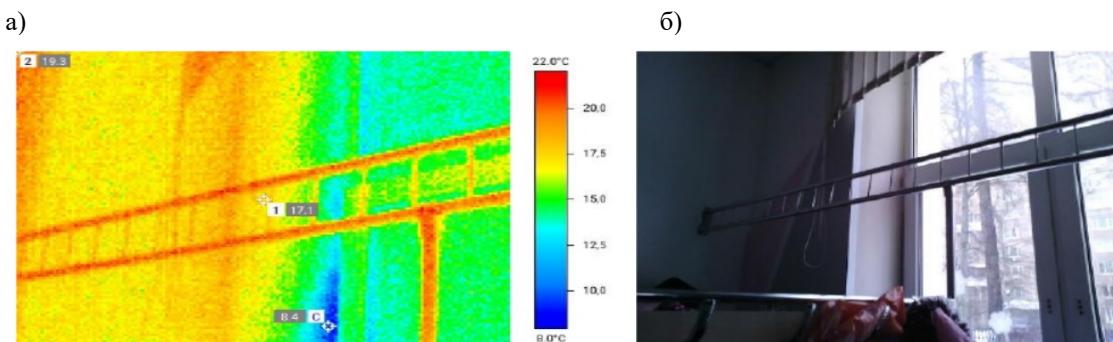


Рис. 1 - Термограмма в помещении раздевалки на 1 этаже школы по 1 варианту:
а – термограмма; б – реальное изображение

Fig. 1 - Thermogram in the changing room on the 1st floor of the school according to option 1:
a – thermogram; b – real image

На рис. 2 в помещении лестничной клетки также имеются проблемные зоныстыка наружной двери (без тамбура) и наружной стены. Здесь наименьшая температура поверхности соответствует $2,4^{\circ}\text{C}$. Кроме этого нижняя часть двери имеет зазор, который выхолаживает пол первого этажа и создает ощущение постоянного сквозняка (рис. 3).

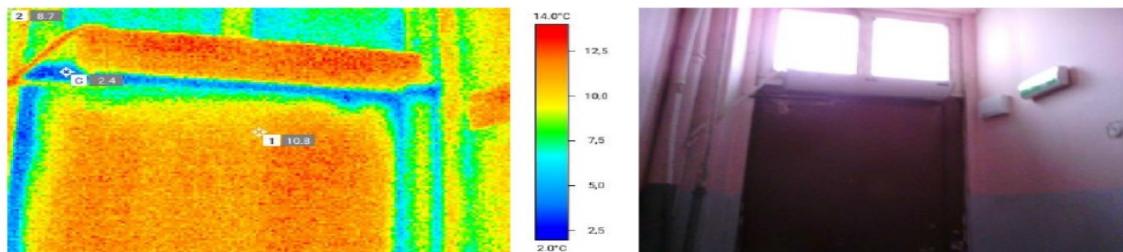


Рис. 2 - Термограмма верхней части наружной двери в лестничной клетке на 1 этаже школы по 1 варианту: а – термограмма; б – реальное изображение

Fig. 2 - Thermogram of the upper part of the external door in the stairwell on the 1st floor of the school according to option 1: a – thermogram; b – real image

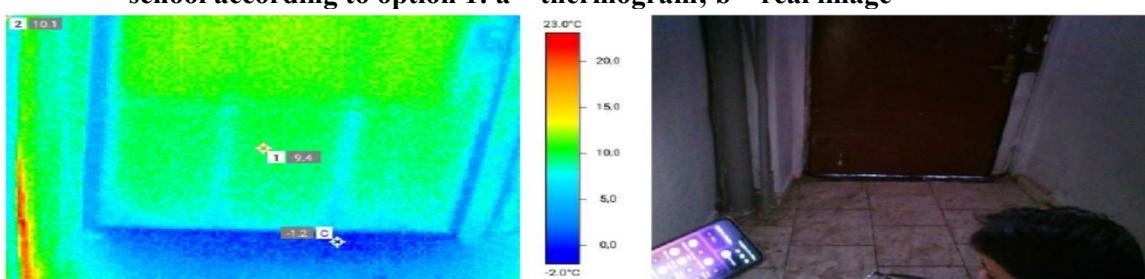


Рис. 3 - Термограмма нижней части наружной двери в лестничной клетке на 1 этаже школы по 1 варианту: а – термограмма; б – реальное изображение

Fig. 3 - Thermogram of the lower part of the outer door in the stairwell on the 1st floor of the school according to option 1: a – thermogram; b – real image

На рис. 4 - 6 представлены термограммы второй школы, соответствующие измерениям по фасадам здания. Рассмотрим только проблемные зоны, которые обнаружились в результате натурного исследования.

На рис. 4 предста влены данные по фасаду пристройки к школе, где на 1 этаже находится столовая, а на втором спортивный зал. Анализ термограммы позволяет выявить неоднородности стеновой панели и как следствие излишние тепловые потери. Интересен и тот факт, что даже швы между панелями имеют большее значение сопротивление теплопередаче, чем сама панель.

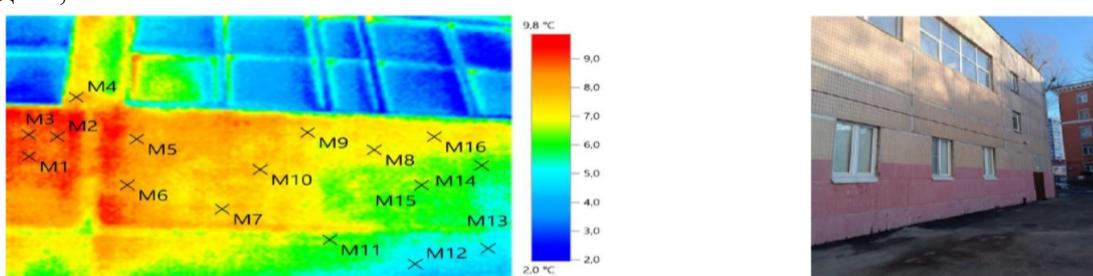


Рис. 4 - Термограмма фасада школы (пристройка) по 2 варианту: а – термограмма; б – реальное изображение

Fig. 4 - Thermogram of the school facade (extension) according to option 2: a – thermogram; b – real image

По данным термограммы северной части фасада школы так же обнаружены дефекты в кирпичной кладке, что приводит к повышению температуры наружной поверхности вплоть до $+4,8^{\circ}\text{C}$, что соответствует точке M1 на рис. 5а. При обследовании восточной части фасада (рис. 6) повышение температуры наружной поверхности под окнами свидетельствуют о том, что со стороны помещения там установлены отопительные приборы.

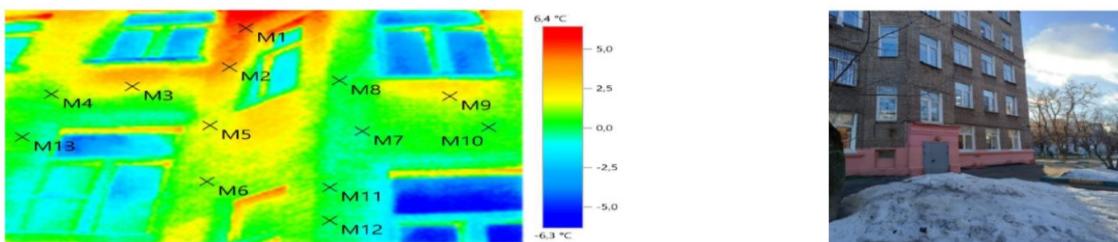


Рис. 5-Термограмма северной части фасада школы по 2 варианту: а – термограмма; б – реальное изображение

Fig. 5-Thermogram of the northern part of the school facade according to option 2:
a – thermogram; b – real image

А вот повышение температуры до $+10,8^{\circ}\text{C}$ в точке М5 уже указывает на дефект конструкции примыкания окна и наружной стены.

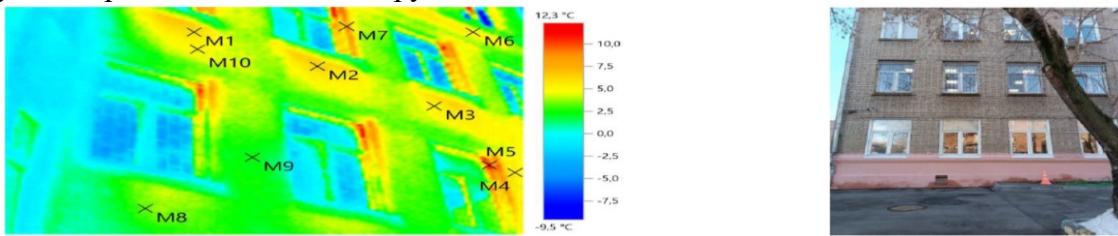


Рис. 6-Термограмма восточной части фасада школы по 2 варианту: а – термограмма; б – реальное изображение

Fig. 6- Thermogram of the eastern part of the school facade according to option 2:
a – thermogram; b – real image

Тепловизионное обследование общеобразовательных учреждений в Москве выявило значительные теплопотери в отдельных помещениях и на фасадах зданий.

В первой школе наибольшие тепловые потери обнаружены в зоне стыка оконного блока и наружной стены раздевалки, а также в зоне стыка наружной двери и наружной стены лестничной клетки. Во второй школе выявлены неоднородности стеновой панели пристройки, дефекты в кирпичной кладке северной части фасада и дефекты конструкции примыкания окна и наружной стены восточной части фасада.

Результаты исследования указывают на необходимость проведения ремонтных работ для повышения качества тепловой изоляции и энергоэффективности обследуемых зданий.

Вывод. При проведении исследования с помощью тепловизионной съемки были выявлены дефекты фасада школы по 2 варианту и основные причины некомфортного пребывания людей на 1 этаже школы по варианту 1.

Выявлена недостаточная тепловая защита зданий в связи с несовершенством утепления ограждающих конструкций, некорректными применением входных дверей (не утепленные, без тамбура), что влечет за собой возможную конденсацию влаги на внутренней поверхности наружной стены и двери, а также некомфортные условия микроклимата в помещениях. Выявлено, что солнечная погода в холодное время года влияет на проведение тепловизионной съемки и не дает провести замеры корректно, даже с учетом, что количество тепловой энергии от солнечной радиации в это время года незначительно.

Отметим несколько ключевых положений по результатам исследования:

1. Проведенное тепловизионное обследование общеобразовательных учреждений в г.Москве выявило наличие существенных тепловых потерь в ограждающих конструкциях зданий, которые приводят к снижению энергоэффективности и комфорта пребывания людей.

2. В первой школе, с блочными наружными ограждающими конструкциями, наибольшие тепловые потери зафиксированы в зонах стыков оконных блоков и наружных стен, а также в местах примыкания наружных дверей к стенам.

3. Во второй школе, с фасадом из минераловатных плит, выявлены неоднородности теплоизоляционного слоя, дефекты кирпичной кладки и дефекты конструкции примыкания окон к наружным стенам.

4. Результаты научных изысканий подтверждают актуальность проблемы ухудшения теплотехнических характеристик наружных ограждающих конструкций с течением времени и необходимость своевременного выявления и устранения дефектов.

5. Полученные термограммы и данные о температурах позволяют локализовать проблемные зоны и служат основанием для разработки рекомендаций по ремонту и модернизации ограждающих конструкций с целью повышения их теплозащитных свойств.

6. Для обеспечения комфортного микроклимата в помещениях общеобразовательных учреждений рекомендуется проведение регулярных тепловизионных обследований и своевременное устранение выявленных дефектов.

7. Полученные результаты могут быть применены для разработки и реализации программ по повышению энергоэффективности образовательных учреждений в городе Москве и других населенных пунктах с похожими климатическими условиями.

Библиографический список:

1. Frolova A., Ledovskikh I., Panin K., Ramazanov E. Experimental determination of the thermal conductivity of building materials under operating conditions. E3S Web of Conferences. 2024. Т. 549. С. 05012.
2. Фролова А.А., Лухменёв П.И. Расчет уровня энергетически целесообразной теплозащиты. Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. № 1. С. 82-90.
3. Усиков С.М., Прилуцкий В. Совокупная тепловая инерция отапливаемого помещения и отопительного прибора. В сборнике: Актуальные проблемы строительной отрасли и образования - 2022. Сборник докладов Третьей Национальной научной конференции. Москва, 2023. С. 869-875.
4. Малявина Е.Г., Ландырев С.С. Проверка выполнения требований норм к внутреннему микроклимату углового помещения. Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2022. № 12. С. 39-45.
5. Курилюк И.С., Крышов С.И., Ермаков А.В. Результаты натурных исследований теплозащитных качеств навесных вентилируемых фасадов Москвы. Жилищное строительство. 2022. № 6. С. 39-43.
6. Д.А. Драпалюк, Н.А. Драпалюк, А.В. Исанова, М.С. Кононова. Особенности тепловлажностного режима чердачных помещений детских садов со скатными кровлями. Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. 2022. № 4(23). С. 44-51.
7. А.И. Калинина, А.Р. Макаров, Е.С. Арапов. Особенности формирования микроклимата в помещениях с повышенной влажностью, с учетом теплотехнических характеристик ограждающих конструкций. Инновации и инвестиции. 2021. № 3. С. 256-259.
8. Н.С. Новиков, С.О. Титков. Общие вопросы проведения технического обследования зданий и сооружений. Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2019. № 6(140)-С. 47-52.
9. Mayer, Zoe and Epperlein, Andres and Vollmer, Elena and Volk, Rebekka and Schultmann, Frank. Investigating the Quality of UAV-Based Images for the Thermographic Analysis of Buildings. Remote Sensing. 15. 301. (2023). <https://doi.org/10.3390/rs15020301>.
10. Austynas, Gintautas and Ignatavičienė, Laima and Nesovas, Deividas. Thermographic Examination of the Thermal Insulation Condition of the Heating Point during Exploitation. Applied Scientific Research. 3. 35-40. (2024). <https://doi.org/10.56131/tmt.2024.3.1.206>.
11. Tejedor, Blanca and Gaspar, Kàtia and Casals, Miquel and Gangolells, Marta. Analysis of the Applicability of Non-Destructive Techniques to Determine In Situ Thermal Transmittance in Passive House Façades. Applied Sciences. 10(23). 8337. (2020). <https://doi.org/10.3390/app10238337>.
12. Garrido, Iván and Lagüela, Susana and Otero, Roi and Arias, Pedro. Thermographic methodologies used in infrastructure inspection: A review-data acquisition procedures. Infrared Physics and Technology. 111. 103481. (2020). <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2020.103481>.
13. Rodriguez, Jose and Frias, Jesus and Cespón, José and Vilariño, Lucia. Thermographic comparative study using smartphone and camera technology in buildings. DYNA. 99. 12-16. 2024. <https://doi.org/10.6036/11002>.
14. Fonseca, T., Ferreira, J.C. Detection of Cracks in Building Facades Using Infrared Thermography. In: Abraham, A., Bajaj, A., Gandhi, N., Madureira, A.M., Kahraman, C. (eds) Innovations in Bio-Inspired Computing and Applications. IBICA 2022. Lecture Notes in Networks and Systems. Vol. 649. (2023). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-27499-2_25.
15. Chicherin, Stanislav and Zhuikov, Andrey and Junussova, Lyazzat. District Heating for Poorly Insulated Residential Buildings-Comparing Results of Visual Study, Thermography, and Modeling. Sustainability. 15. 14908. (2023). <https://doi.org/10.3390/su152014908>.

16. Xhexhi, K. Existing Site Conditions. Building Thermography and U-value Measurements. Case Study Tirana, Albania. In: Ecovillages and Ecocities. The Urban Book Series. Springer, Cham. (2023). https://doi.org/10.1007/978-3-031-20959-8_7.
17. Gertsvolf, David and Horvat, Miljana and Aslam, Danesh and Khademi, April and Berardi, Umberto. A U-net convolutional neural network deep learning model application for identification of energy loss in infrared thermographic images. *Applied Energy*. 360. 122696. (2024). <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.122696>.
18. Parracho, D.F.R., Poças Martins, J., Barreira, E. A Workflow for Photogrammetric and Thermographic Surveys of Buildings with Drones. In: González García, M.d.l.N., Rodrigues, F., Santos Baptista, J. (eds) New Advances in Building Information Modeling and Engineering Management. Digital Innovations in Architecture, Engineering and Construction. Springer, Cham. (2023). https://doi.org/10.1007/978-3-031-30247-3_5.
19. ГОСТ Р 54852-2024 Здания и Сооружения. Методы определения показателей теплозащитной оболочки на базе тепловизионного обследования и натурных измерений. 2024. 40 с.
20. Чернухин С.П., Жерлыкина М.Н., Кретов М.А. Анализ теплозащитных характеристик стеновых ограждений с использованием тепловизионных исследований. Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. 2023. № 4 (27). С. 40-52.
21. Пешнин, А. Н. Оценка качества результатов тепловизионных обследований ограждающих конструкций зданий. Инновационная наука. 2019. № 7-8. С. 27-29.
22. М.М. Косухин, А.М. Косухин, А.С. Шаповалова. Энергоэффективные материалы и технологии для теплоизоляционных фасадных систем гражданских зданий. Энергетические системы. 2018. № 1. С. 164-171.
23. Analyzing Thermal Images to Evaluate Thermal Protection in Residential Structures: Lessons from Russian Practices / Kh. M. Vafaeva, D. F. Karpov, M. V. Pavlov [et al.] // E3S Web of Conferences. – 2024. – Vol. 511. – Р. 01037. – DOI 10.1051/e3sconf/202451101037.
24. Карпов Д. Ф. Алгоритм комплексной диагностики технического состояния строительных конструкций по анализу термограмм / Д. Ф. Карпов // Строительные материалы и изделия. – 2019. – Т. 2, № 2. – С. 23-28.
25. Zhangabay N., Tursunkululy T., Ibraimova U., Bakhbergen S., Kolesnikov A. Field thermal imaging surveys of residential buildings – a prereq-uiste for the development of energy-efficient external enclosures. *Construction Materials and Products*. 2024. 7 (6). 1. <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2024-7-6-1>.
26. Некоторые особенности и результаты теплового контроля навесных вентилируемых фасадных систем объектов капитального строительства / Д. Ф. Карпов, М. В. Павлов, А. А. Синицын [и др.] // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2020. – Т. 47, № 1. – С. 147-155. – DOI 10.21822/2073-6185-2020-47-1-147-155.

References:

1. Frolova A., Ledovskikh I., Panin K., Ramazanov E. Experimental determination of the thermal conductivity of building materials under operating conditions. *E3S Web of Conferences*. 2024;549: 05012.
2. Frolova A.A., Lukhmenev P.I. Calculation of the level of energetically feasible thermal protection. *Bulletin of MGSU*. 2023;18:1: 82-90. (In Russ)
3. Usikov S.M., Prilutsky V. Total thermal inertia of a heated room and a heating device. In the collection: Actual problems of the construction industry and education - 2022. Collection of reports of the Third National Scientific Conference. Moscow, 2023: 869-875. (In Russ)
4. Malyavina E.G., Landyrev S.S. Checking the compliance with the requirements of the standards for the internal microclimate of a corner room. *Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2022;12: 39-45. (In Russ)
5. Kurilyuk I.S., Kryshov S.I., Ermakov A.V. Results of in-kind studies of the thermal protection qualities of curtain wall ventilated facades in Moscow. *Housing construction*. 2022; 6: 39-43. (In Russ)
6. D.A. Drapalyuk, N.A. Drapalyuk, A.V. Isanova, M.S. Kononova. Features of the heat and humidity regime of attic spaces of kindergartens with pitched roofs. *Housing and communal infrastructure*. 2022;4(23) 44-51.(In Russ)
7. A.I. Kalinina, A.R. Makarov, E.S. Aralov. Features of microclimate formation in rooms with high humidity, taking into account the thermal characteristics of enclosing structures. *Innovations and Investments*. 2021;3:256-259. (In Russ)
8. N.S. Novikov, S.O. Titkov. General issues of technical inspection of buildings and structures. *Bulletin of the Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture*. 2019; 6(140):47-52. (In Russ)
9. Mayer, Zoe and Epperlein, Andres and Vollmer, Elena and Volk, Rebekka and Schultmann, Frank. Investigating the Quality of UAV-Based Images for the Thermographic Analysis of Buildings. *Remote Sensing*. 15. 301. (2023). <https://doi.org/10.3390/rs15020301>.
10. Austynas, Gintautas and Ignatavičienė, Laima and Nesovas, Deividas. Thermographic Examination of the Thermal Insulation Condition of the Heating Point during Exploitation. *Applied Scientific Research*. 2024; 3. 35-40. <https://doi.org/10.56131/tmt.2024.3.1.206>.
11. Tejedor, Blanca and Gaspar, Kàtia and Casals, Miquel and Gangolells, Marta. Analysis of the Applicability of Non-Destructive Techniques to Determine In Situ Thermal Transmittance in Passive House Façades. *Applied Sciences*. 2020; 10(23): 8337. <https://doi.org/10.3390/app10238337>.
12. Garrido, Iván and Lagüela, Susana and Otero, Roi and Arias, Pedro. Thermographic methodologies used in infrastructure inspection: A review-data acquisition procedures. *Infrared Physics and Technology*. 111. 2020; 111:103481. (<https://doi.org/10.1016/j.infrared.2020.103481>.

13. Rodriguez, Jose and Frias, Jesus and Cespón, José and Vilariño, Lucia. Thermographic comparative study using smartphone and camera technology in buildings. DYNA. 2024;99:12-16.. <https://doi.org/10.6036/11002>.
14. Fonseca, T., Ferreira, J.C. Detection of Cracks in Building Facades Using Infrared Thermography. In: Abraham, A., Bajaj, A., Gandhi, N., Madureira, A.M., Kahraman, C. (eds) Innovations in Bio-Inspired Computing and Applications. IBICA 2022. Lecture Notes in Networks and Systems. 2023; 649. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-27499-2_25.
15. Chicherin, Stanislav and Zhiukov, Andrey and Junussova, Lyazzat. District Heating for Poorly Insulated Residential Buildings-Comparing Results of Visual Study, Thermography, and Modeling. Sustainability. 15. 14908. (2023). <https://doi.org/10.3390/su152014908>.
16. Xhexhi, K. Existing Site Conditions. Building Thermography and U-value Measurements. Case Study Tirana, Albania. In: Ecovillages and Ecocities. The Urban Book Series. Springer, Cham. (2023). https://doi.org/10.1007/978-3-031-20959-8_7.
17. Gertsvolf, David and Horvat, Miljana and Aslam, Danesh and Khademi, April and Berardi, Umberto. A U-net convolutional neural network deep learning model application for identification of energy loss in infrared thermographic images. Applied Energy. 360. 122696. (2024). <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.122696>.
18. Parracho, D.F.R., Poças Martins, J., Barreira, E. A Workflow for Photogrammetric and Thermographic Surveys of Buildings with Drones. In: González García, M.d.I.N., Rodrigues, F., Santos Baptista, J. (eds) New Advances in Building Information Modeling and Engineering Management. Digital Innovations in Architecture, Engineering and Construction. Springer, Cham. (2023). https://doi.org/10.1007/978-3-031-30247-3_5.
19. GOST R 54852-2024 Buildings and Structures. Methods for Determining Thermal Protection Shell Parameters Based on Thermal Imaging Surveys and In-kind Measurements. 2024:40. (In Russ)
20. Chernukhin S.P., Zherlykina M.N., Kretov M.A. Analysis of thermal protection characteristics of wall enclosures using thermal imaging studies. *Housing and communal infrastructure*. 2023;4 (27): 40-52. (In Russ)
21. Peshnin, A.N. Assessment of the quality of the results of thermal imaging surveys of building envelopes. *Innovative science*. 2019;7-8: 27-29. (In Russ)
22. M. M. Kosukhin, A. M. Kosukhin, A. S. Shapovalova. Energy-efficient materials and technologies for thermal insulation facade systems of civil buildings. *Energy systems*. 2018;1:164-171. (In Russ)
23. Analyzing Thermal Images to Evaluate Thermal Protection in Residential Structures: Lessons from Russian Practices / Kh. M. Vafaeva, D. F. Karpov, M. V. Pavlov [et al.] *E3S Web of Conferences*. 2024; 511: 01037. – DOI 10.1051/e3sconf/202451101037. (In Russ)
24. Karpov D. F. Algorithm for comprehensive diagnostics of the technical condition of building structures based on the analysis of thermograms. *Construction materials and products*. 2019;2(2):23-28. (In Russ)
25. Zhangabay N., Tursunkululy T., Ibraimova U., Bakhbergen S., Kolesnikov A. Field thermal imaging surveys of residential buildings – a prereq-uiste for the development of energy-efficient external enclosures. *Construction Materials and Products*. 2024. 7 (6). 1. <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2024-7-6-1>.
26. Some features and results of thermal control of curtain wall ventilated facade systems of capital construction projects / D. F. Karpov, M. V. Pavlov, A. A. Sinitsyn [et al.] *Herald of Dagestan State Technical University. Technical sciences*. 2020; 47(1):147-155. DOI 10.21822/2073-6185-2020-47-1-147-155. (In Russ)

Сведения об авторах:

Фролова Анастасия Анатольевна, кандидат технических наук, доцент, доцент, кафедра теплогазоснабжения и вентиляции; FrolovaAA@mgsu.ru; ORCID 0000-0002-7802-8981

Карпов Денис Федорович, старший преподаватель, кафедра теплогазоводоснабжения; karpovdf@vogu35.ru; ORCID 0000-0002-3522-9302

Вафаева Христина Максудовна, научный сотрудник, лаборатория самовосстанавливающихся конструкционных материалов; vafaeva.khm@gmail.com; ORCID 0000-0002-7422-5494

Гаевская Злата Анатольевна, кандидат архитектуры, доцент, доцент высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства; gaevskaya_za@spbstu.ru; ORCID 0000-0002-4819-7522

Information about authors:

Anastasiya A. Frolova, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Assoc. Prof., Department of Ventilation and Heat and Gas Supply; FrolovaAA@mgsu.ru; ORCID 0000-0002-7802-8981

Denis F. Karpov, Senior Lecturer, Department of Heat, Gas and Water Supply; karpovdf@vogu35.ru; ORCID 0000-0002-3522-9302

Khristina M. Vafaeva, Scientific Associate, Laboratory of Self-Healing Structural Materials; vafaeva.khm@gmail.com; ORCID 0000-0002-7422-5494

Zlata A. Gaevskaya, Cand. of Architecture, Ph.D. in Architecture, Assoc. Prof., Assoc. Prof., Higher School of Industrial, Civil and Road Construction; gaevskaya_za@spbstu.ru; ORCID 0000-0002-4819-7522

Конфликт интересов/Conflict of interests.

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

Поступила в редакцию/ Received 15.11.2024.

Одобрена после рецензирования/Revised 28.12.2024.

Принята в печать/Accepted for publication 18.01.2025.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 624.04

DOI: 10.21822/2073-6185-2025-52-1-227- 241



Оригинальная статья /Original article

Расчетные модели плит с односторонними связями

А.К. Юсупов, Х.М. Муселемов, Р.И. Вишталов

Дагестанский государственный технический университет,
367015, г. Махачкала, пр. И.Шамиля,70, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является определение особенности работы пластиначатых конструкций, обладающих односторонними связями. Рассматриваются вопросы, которые позволяют строить расчетные модели плит на дискретных опорах и сплошных массивах с односторонними связями, а также приводятся алгоритмы, которые позволяют анализировать работу пластиначатых конструкций (двумерных конструкций в плане). **Метод.** Построены аналитические и графические зависимости между перемещениями плит и реакциями их опор. Используются свойства обобщённых функций, которые позволяют описывать нелинейности, проявляющиеся при деформациях конструкций. Приведены дифференциальные уравнения поперечного изгиба плит, учитывающие указанные выше особенности работы опор. Излагаются методы решения этих уравнений. **Результат.** Представленные конструктивные и расчётные схемы позволяют правильно учитывать работу опор пластиначатых конструкций, получать на этом основании более точные значения прогибов и внутренних усилий в сечениях, что обеспечивает необходимую надёжность работы конструкции. Результаты приводятся в виде аналитических выражений, графиков и таблиц. **Вывод.** Разработаны конструктивные и расчётные схемы пластиначатых конструкций, обладающих особенностями работы опор с односторонними связями. Сформулированы рекомендации, которые могут быть использованы при проектировании реальных пластиначатых конструкций с односторонними связями.

Ключевые слова: плиты, опоры, односторонние связи, нелинейности, обобщённые функции, включающиеся и выключающиеся связи, дифференциальные уравнения, поперечный изгиб, внутренние усилия, прогибы, перемещения

Для цитирования: А.К. Юсупов, Х.М. Муселемов, Р.И. Вишталов. Расчетные модели плит с односторонними связями. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025;52(1):227-241. DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-1-227-241

Calculation models of slabs with one-way connections

A.K. Yusupov, Kh.M. Muselemov, R.I. Vishtalov

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

Abstract. Objective. The aim of the study is to determine the performance characteristics of plate structures with one-sided connections. The paper considers issues that allow constructing calculation models of slabs on discrete supports and solid arrays with one-sided connections, and provides algorithms that allow analyzing the performance of plate structures (two-dimensional structures in plan). **Method.** Analytical and graphical dependencies between slab displacements and their support reactions are constructed. Properties of generalized functions are used to describe nonlinearities that occur during structural deformations. Differential equations for transverse bending of slabs are presented, taking into account the above-mentioned performance characteristics of supports. Methods for solving these equations are presented. **Result.**

The presented design and calculation schemes allow correctly taking into account the performance of plate structure supports, and obtaining more accurate values of deflections and internal forces in sections on this basis, which ensures the required reliability of the structure. The results are presented in the form of analytical expressions, graphs, and tables. **Conclusion.** Design and calculation schemes of plate structures with the features of the work of supports with one-sided connections have been developed. Recommendations have been formulated that can be used in the design of real plate structures with one-sided connections.

Keywords: slabs, supports, one-sided connections, nonlinearities, generalized functions, switching on and off connections, differential equations, transverse bending, internal forces, deflections, displacements

For citation: A.K. Yusupov, Kh.M. Muselemov, R.I. Vishtalov. Calculation models of slabs with one-way connections. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2025;52(1): 227-241. (In Russ) DOI:10.21822 /2073-6185-2025-52-1-227-241

Введение. Модели плит на дискретных опорах и сплошных основаниях используются не только при наличии подстилающего конструкцию массива, но даже, когда такого массива вообще нет. В этом случае плиты принимается за модель, которая позволяет проводить исследования работы реальной конструкции и прогнозировать поведение проектируемого объекта в процессе его эксплуатации.

На рис.1 показана конструктивная схема висячего моста. Жесткая плита (настил) подвешена на гибких нитях. При этом работа жесткой плиты может быть смоделирована плитой на упругом основании. Упругим основанием для плиты здесь служат вертикальные гибкие нити.

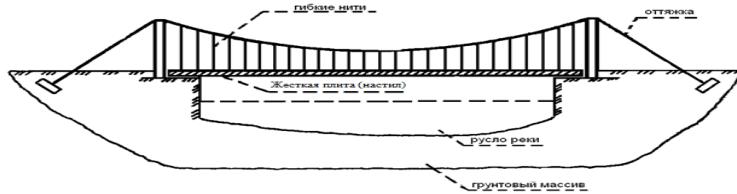


Рис. 1 - Конструктивная схема висячего моста
Fig. 1 - Structural diagram of a suspension bridge

Вертикальные гибкие нити оказывают сопротивление прогибам настила моста, когда прогибы положительны, при отрицательных прогибах настила (прогибы вверх) гибкие нити не работают. Таким образом система вертикальных гибких нитей обладают свойством односторонних связей. На рис. 2 дана конструктивная схема разреза фундаментной плиты, лежащей на упругом основании. Здесь, когда прогибы плиты направлены вверх, упругий подстилающий массив не оказывает сопротивления перемещениям. Упругий массив работает исключительно, когда прогибы плиты направлены вниз. Другими словами, здесь упругий массив обладает свойством односторонних связей.

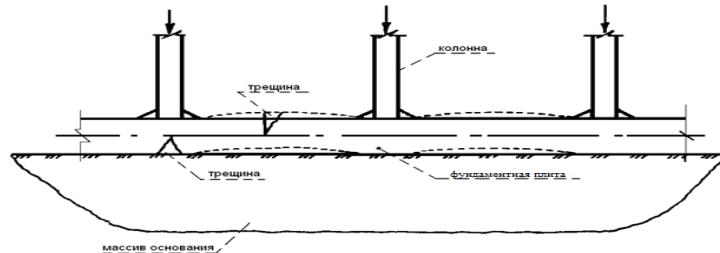


Рис. 2 - Конструктивная схема разреза фундаментной плиты
Fig. 2 - Structural diagram of the foundation slab section

На рис.3 изображена конструктивная схема настила проезжей части моста. Насыпь представляет собой плиту, свободно лежащую на поперечных стенах. При этом поперечные стены работают, когда настил получает перемещения вниз. А при перемещениях

вверх стены не работают. То есть, стенные опоры обладают свойством односторонних связей.

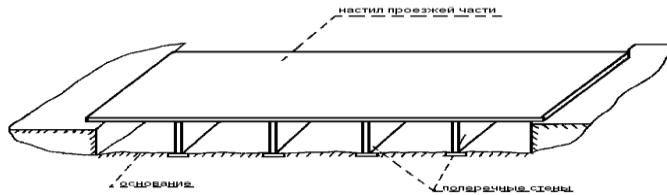


Рис. 3 - Конструктивная схема настила проезжей части моста
 Fig. 3 - Structural diagram of the decking of the roadway of the bridge

На рис.4 приведена конструктивная схема плиты площадки, которая опирается одной стороной на стену, а другой на отдельно стоящую колонну. Колонна оказывает сопротивление прогибам плиты, когда плита получает перемещения вниз. А в случае перемещений, направленных вверх, колонна не работает. Опора обладает свойствами односторонних связей.

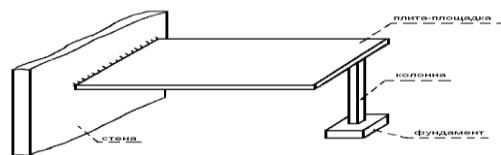


Рис. 4 - Конструктивная схема плиты площадки
 Fig. 4 - Structural diagram of the platform slab

Приведенные здесь примеры свидетельствуют о том, что плиты на дискретных опорах или сплошных массивах, в первую очередь, следует рассматривать как расчетные модели, которые могут быть использованы для исследования работы контактных систем [7, 8].

Постановка задачи. При расчёте и компоновке пластинчатых конструкций их опоры рассматриваются как линейные системы. Для описания особенностей работы этих опор пользуются моделью Винклера. Работа опор пластинчатых конструкций далеко не всегда подчиняется линейным зависимостям: эти зависимости существенно нелинейны и для их описания необходимо пользоваться свойствами обобщённых функций, которые позволяют учитывать дискретность опор и скачкообразные изменения их реакций. Обычные функции не позволяют проделать эти процедуры.

В статье приведены алгоритмы с использованием обобщённых функций, что позволяет вводить в дифференциальные уравнения поперечного изгиба плит соответствующие звенья. При этом, уравнения приспособливаются к особенностям работы опор плит с односторонними связями. Всё это даёт возможность построить решения дифференциальных уравнений, определить значения перемещений и внутренних усилий в сечениях плит с учётом особенностей работы их опор, о которых говорилось выше.

Методы исследования. Воспользуемся уравнением поперечного изгиба ортотропной плиты [3,6,7].

$$\tilde{L} W_3 = q_3 + r_3, \quad (1)$$

которое в развернутом виде запишется так:

$$\begin{aligned} T_1^0 \cdot \frac{\partial^4 W_3}{\partial x_1^4} + T_2^0 \cdot \frac{\partial^4 W_3}{\partial x_2^4} + (T_1^0 + T_2^0) \cdot \frac{\partial^4 W_3}{\partial x_1^2 \partial x_2^2} - \\ - \sum_j \left[\frac{\partial^2 W_3}{\partial x_1^2} \cdot d_{1j} + \frac{\partial^2 W_3}{\partial x_2^2} \cdot d_{2j} - W_3 \cdot r_{3j} \right] \times \\ \times \delta(x_1 - \xi_j) \cdot \delta(x_2 - \eta_j) = q_3(x_1, x_2). \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь: $j = 1, 2, 3, \dots$ пробегает по всем дискретным опорам; d_{1j}, d_{2j}, r_{3j} – коэффициенты жесткости j -ой опоры, δ дельта-функция;

ξ_j, η_j – координаты в плане j -ой – дискретной опоры ξ_j – по оси x_1 , η_j по оси x_2); $W_3 = W_3(x_1, x_2)$ – функция прогибов; T_1^0, T_2^0 – параметры жесткости ортотропной плиты (определение этих коэффициентов дано в [3]; $q_3(x_1, x_2)$ – функция распределения поперечной нагрузки по площади плиты.

Если реакции дискретных опор нелинейно зависят от функции перемещений или ее производных, то уравнение (2) приобретает вид:

$$T_1^0 \cdot \frac{\partial^4 W_3}{\partial x_1^4} + T_2^0 \cdot \frac{\partial^4 W_3}{\partial x_2^4} + (T_1^0 + T_2^0) \frac{\partial^4 W_3}{\partial x_1^2 \partial x_2^2} - \sum_j \left[f_{1j} \left(\frac{\partial^2 W_3}{\partial x_1^2} \right) + f_{2j} \left(\frac{\partial^2 W_3}{\partial x_2^2} \right) - f_{3j}(W_3) \cdot \delta(x_1 - \xi_j) \cdot \delta(x_2 - \eta_j) \right] = q_3(x_1, x_2). \quad (3)$$

Здесь: f_{1j}, f_{2j}, f_{3j} – нелинейные функции, описывающие связь между реакциями и перемещениями (или их производными) j -ой опоры; причем f_{1j} – при поворотах сечения плиты в направлении оси x_1 (то есть в вертикальной плоскости, проходящей по оси x_1); f_{2j} – при поворотах сечения плиты в направлении оси x_2 ; f_{3j} – при перемещениях плиты по оси x_3 (при поперечных перемещениях).

Таким образом, (в общем случае) каждая j -ая дискретная опора имеет свою нелинейность, которая выражается тремя функциями f_{1j}, f_{2j}, f_{3j} [16].

Этими функциями могут описываться выпуклые, вогнутые, ломанные, скачкообразные нелинейности, а также особенности работы опор с односторонними, включающими, выключающими связями [1]. В частности, когда $f_{1j} = f_{2j} = 0$, а по вертикальной оси опоры обладают свойством односторонних связей:

$$f_{3j} = C_j \cdot e[w(x_1, x_2)], \quad (3, a)$$

где C_j – коэффициент жесткости j -ой опоры, e – единичная функция (функция – скачка).

Теперь уравнение (3) в случае опор с односторонними связями, с учетом равенства (3, a), записывается так:

$$T_1^0 \cdot \frac{\partial^4 W_3}{\partial x_1^4} + T_2^0 \cdot \frac{\partial^4 W_3}{\partial x_2^4} + (T_1^0 + T_2^0) \frac{\partial^4 W_3}{\partial x_1^2 \partial x_2^2} + \sum_j C_j \cdot e[w(x_1, x_2)] \cdot \delta(x_1 - \xi_j) \cdot \delta(x_2 - \eta_j) = q_3(x_1, x_2). \quad (3, b)$$

Обсуждение результатов. Уравнение (3, б) записано для случая опорной плиты, когда параметры ее жесткости T_1^0, T_2^0 считаются постоянными, не зависящими от координат x_1, x_2 . При развитии пластических деформаций, раскрытии трещин, нерегулярном по площади армировании параметры T_1^0, T_2^0 будут зависеть от координат x_1, x_2 , то есть будут функциями переменных x_1, x_2 . В этом случае параметры жесткости обозначаются так: $\bar{T}_1 = \bar{T}_1(x_1, x_2)$, $\bar{T}_2 = \bar{T}_2(x_1, x_2)$.

Соответствующее дифференциальное уравнение поперечного изгиба плиты на дискретных опорах с односторонними связями можно представить в виде:

$$L^*W_3 + \sum_j C_j \cdot e [w(x_1, x_2)] \cdot \delta(x_1 - \xi_j) \cdot \delta(x_2 - \eta_j) = q_3(x_1, x_2) \quad (4)$$

Здесь: $W_3 = W_3(x_1, x_2)$; L^*W_3 – оператор, который определяется

с учетом того, что жесткости плиты – переменные по координатам. Этот оператор имеет сложный вид[6,19]. В статье этот оператор не приводим.

При $T_i = T_i^0 = \text{const}$, $B_i = B_i^0 = \text{const.}$, оператор, входящий в уравнение (3,6), становится бигармоническим.

При $|T_1^0 - T_2^0| \leq 2$, $T_1^0 + T_2^0 \approx \sqrt{2} \cdot \sqrt{T_1^0 \cdot T_2^0}$ Этот оператор принимает вид

оператора Губера [3, 7]. Рассмотрим плиты, показанные на рис. 5-7. Дискретные опоры пометим в плане звездочками, а координаты j -ой опоры обозначим через ξ_j, η_j (рис. 5а, 6а, 7а). На рис.5а плита оперта по прямоугольному контуру, то есть имеет отверстие в виде треугольника; опирание может быть как по внешнему, так и по внутреннему контуру, или по одному из контуров.

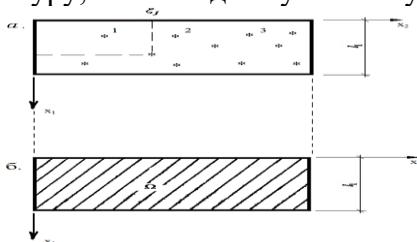


Рис. 5 - Схема плиты в заданной и основной системах

Fig. 5 - Scheme of the plate in the given and main systems

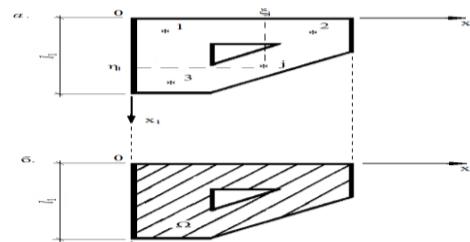


Рис. 6 - Схема плиты в заданной и основной системах

Fig. 6 - Scheme of the plate in the given and main systems

На рис. 7а плита имеет криволинейный контур; опирание по контуру – произвольное. На эти плиты действует поперечная нагрузка $q(x_1, x_2)$. С целью построения алгоритма, позволяющего исследовать напряженно-деформированное состояние рассматриваемых плит, перейдем от заданных систем к основным. При этом заданными системами будем считать рассматриваемые плиты (рис. 5а, 6а, 7а), для которых указаны нагрузки $q(x_1, x_2)$; даны координаты ξ_j, η_j опоры с номером j ; определены соответствующие коэффициенты жесткости опор d_{1j}, d_{2j}, r_{3j} ; известны условия крепления плиты по контуру (по внешнему и внутреннему); вычислены параметры жесткости плиты T_1^0, T_2^0 . Соответствующие основные системы показаны на рис. 5б, 6б, 7б. Основная система отличается от заданной только тем, что здесь отсутствуют дискретные опоры, а все остальные условия остаются без изменения.

Для решения приведенных выше дифференциальных уравнений можно воспользоваться функцией Грина. Функцию Грина для плит в основной системе (где уже нет дискретных опор), далее мы предполагаем известной. Функция $G(x_1, \bar{x}_1, x_2, \bar{x}_2)$ для плиты в основной системе считается известной. Это значит, что функция Грина $G(x_1, \bar{x}_1, x_2, \bar{x}_2)$ удовлетворяет уравнению (при $G \equiv W_3$):

$$T_1^0 \cdot \frac{\partial^4 W_3}{\partial x_1^4} + T_2^0 \cdot \frac{\partial^4 W_3}{\partial x_2^4} + (T_1^0 + T_2^0) \frac{\partial^4 W_3}{\partial x_1^2 \partial x_2^2} = \\ = \delta(x_1 - \bar{x}_1, x_2 - \bar{x}_2).$$

и условиям крепления на внешнем контуре плиты. Если это так, то дифференциальное уравнение (2) можно представить в виде

$$\begin{aligned}
 W_3(x_1, x_2) + \iint_{\Omega} G(x_1, \bar{x}_1, x_2, \bar{x}_2) \times \\
 \times \sum_j \left[-\frac{\partial^2 W_3(\bar{x}_1, \bar{x}_2)}{\partial \bar{x}_1^2} \cdot d_{1j} - \right. \\
 \left. - \frac{\partial^2 W_3(\bar{x}_1, \bar{x}_2)}{\partial \bar{x}_2^2} \cdot d_{2j} + W_3(\bar{x}_1, \bar{x}_2) \right] \times \\
 \times \delta(\bar{x}_1 - \xi_j) \cdot \delta(\bar{x}_2 - \eta_j) d\bar{x}_1 d\bar{x}_2 = \\
 = \iint_{\Omega} G(x_1, \bar{x}_1, x_2, \bar{x}_2) \cdot q(\bar{x}_1, \bar{x}_2) d\bar{x}_1 d\bar{x}_2. \quad (5)
 \end{aligned}$$

Здесь Ω — область плиты в основной системе (на рисунках область Ω заштрихована). Пользуясь фильтрующими свойствами дельта-функции, уравнение (5) можно упростить:

$$\begin{aligned}
 W_3(x_1, x_2) \leftarrow + \sum_j G(x_1, \bar{x}_1, x_2, \bar{x}_2) \cdot \left[-\frac{\partial^2 W_3(\bar{x}_1, \bar{x}_2)}{\partial \bar{x}_1^2} \cdot d_{1j} - \right. \\
 \left. - \frac{\partial^2 W_3(\bar{x}_1, \bar{x}_2)}{\partial \bar{x}_2^2} \cdot d_{2j} + W_3(\bar{x}_1, \bar{x}_2) \cdot r_{3j} \right] \Big|_{x_1 = \xi_j, x_2 = \eta_j} = W_3(\bar{x}_1, \bar{x}_2), \quad (6)
 \end{aligned}$$

где

$$W_3(x_1, x_2) = \iint_{\Omega} G(x_1, \bar{x}_1, x_2, \bar{x}_2) \cdot q(\bar{x}_1, \bar{x}_2) d\bar{x}_1 d\bar{x}_2. \quad (7)$$

Если ввести обозначения типа

$$\frac{\partial^2 W_3(\bar{x}_1, \bar{x}_2)}{\partial \bar{x}_1^2} \Big|_{\substack{x_1 = \xi_j \\ x_2 = \eta_j}} = \frac{\partial^2 W_3(\xi_j, \eta_j)}{\partial x_1^2}, \quad (8)$$

то уравнение (6) можно представить так:

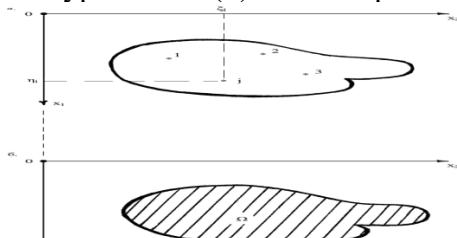


Рис. 7 - Схема плиты в заданной и основной системах

Fig. 7 - Scheme of the plate in the given and main systems

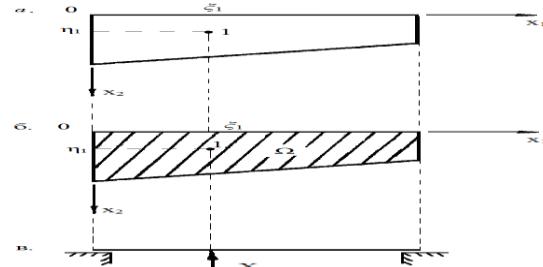


Рис. 8 - Схема плиты в заданной и основной системах

Fig. 8 -Scheme of the plate in the given and main systems

$$\begin{aligned}
 W_3(x_1, x_2) + \sum_j G(x_1, \xi_j, x_2, \eta_j) \times \\
 \times \left[-\frac{\partial^2 W_3(\xi_j, \eta_j)}{\partial x_1^2} \cdot d_{1j} - \right. \\
 \left. - \frac{\partial^2 W_3(\xi_j, \eta_j)}{\partial x_2^2} \cdot d_{2j} + W_3(\xi_j, \eta_j) \cdot r_{3j} \right] = \bar{W}_3(x_1, x_2), \quad (9)
 \end{aligned}$$

где $\bar{W}_3(x_1, x_2)$ - функция (7).

Записывая последнее уравнение в итерационном режиме, имеем:

$$W_3^{(v+1)}(x_1, x_2) = \bar{W}_3(x_1, x_2) + \sum_j G(x_1, \xi_j, x_2, \eta_j) \times$$

$$\times \left[\frac{\partial^2 W_3^{(v)}(\xi_j, \eta_j)}{\partial x_1^2} \cdot d_{1j} + \right. \\ \left. + \frac{\partial^2 W_3^{(v)}(\xi_j, \eta_j)}{\partial x_2^2} \cdot d_{2j} - W_3^{(v)}(\xi_j, \eta_j) \cdot r_{3j} \right], \quad (10)$$

где $v = 0, 1, 2, 3 \dots$ - шаг последовательных приближений.

Нулевой шаг: при $v = 0$ можно принять $W_3^{(0)} = \mathbf{0}$. Тогда из (10) следует, что

$$W_3^{(1)}(x_1, x_2) = \bar{W}_3(x_1, x_2), \quad (11)$$

где \bar{W}_3 - функция (7) - функция прогибов плиты в основной системе.

Первый шаг: при $v = 1$ из равенства (10) находим:

$$W_3^{(2)}(x_1, x_2) = \bar{W}_3(x_1, x_2) + \sum_j G(x_1, \xi_j, x_2, \eta_j) \times \\ \times \left[\frac{\partial^2 W_3^{(1)}(\xi_j, \eta_j)}{\partial x_1^2} \cdot d_{1j} + \frac{\partial^2 W_3^{(1)}(\xi_j, \eta_j)}{\partial x_2^2} \cdot d_{2j} - W_3^{(1)}(\xi_j, \eta_j) \cdot r_{3j} \right]. \quad (12)$$

Здесь значения производных функций прогибов вычисляются с учетом обозначений типа (8) при известной функции (11).

Следующий шаг итераций: $v = 2$. Располагая функцией прогибов $W_3^{(2)}$ (12), вычисленной в предыдущем приближении, из выражения (10) можно найти прогибы $W_3^{(3)}(x_1, x_2)$. Продолжая последовательные приближения нетрудно обеспечить любую необходимую точность. Итерационный процесс сходится очень быстро. Для практических расчетов можно ограничиться функцией прогибов

$$W_3(x_1, x_2) \approx W_3^{(3)}(x_1, x_2).$$

Внутренние усилия вычисляются по формулам [6,10,12,19]:

$$\begin{aligned} M_1 &= -\bar{T}_1 \cdot \left(\frac{\partial^2 W_3}{\partial x_1^2} + \mu \cdot \frac{\partial^2 W_3}{\partial x_2^2} \right); \\ M_2 &= -\bar{T}_2 \cdot \left(\frac{\partial^2 W_3}{\partial x_2^2} + \mu \cdot \frac{\partial^2 W_3}{\partial x_1^2} \right); \\ M_{21} &= -M_{12} = \frac{1-\mu}{2} \cdot (\bar{T}_1 + \bar{T}_2) \cdot \frac{\partial^2 W_3}{\partial x_1 \partial x_2}; \\ Q_1 &= -\frac{\partial}{\partial x_1} \left[\bar{T}_1 \cdot \left(\frac{\partial^2 W_3}{\partial x_1^2} + \mu \cdot \frac{\partial^2 W_3}{\partial x_2^2} \right) \right] - \frac{1-\mu}{2} \cdot \frac{\partial}{\partial x_2} \left[(\bar{T}_1 + \bar{T}_2) \cdot \frac{\partial^2 W_3}{\partial x_1 \partial x_2} \right]; \\ Q_2 &= -\frac{\partial}{\partial x_2} \left[\bar{T}_2 \cdot \left(\frac{\partial^2 W_3}{\partial x_2^2} + \mu \cdot \frac{\partial^2 W_3}{\partial x_1^2} \right) \right] - \frac{1-\mu}{2} \cdot \frac{\partial}{\partial x_1} \left[(\bar{T}_1 + \bar{T}_2) \cdot \frac{\partial^2 W_3}{\partial x_1 \partial x_2} \right]; \\ N_1 &= \bar{B}_1 \cdot \left(\frac{\partial W_1}{\partial x_1} + \mu \cdot \frac{\partial W_2}{\partial x_2} \right); \\ N_2 &= \bar{B}_2 \cdot \left(\frac{\partial W_2}{\partial x_2} + \mu \cdot \frac{\partial W_1}{\partial x_1} \right); \\ T_{21} &= T_{12} = \frac{1-\mu}{2} \cdot \left(\bar{B}_1 \cdot \frac{\partial W_1}{\partial x_2} + \bar{B}_2 \cdot \frac{\partial W_2}{\partial x_1} \right). \end{aligned} \quad (12a)$$

Эту же задачу можно решить и иначе. Итерационный процесс (10), хотя и обеспечивают любую необходимую для расчетов точность, все же считается приближенным. Рассмотрим метод, который часто применяется при исследовании напряженно-деформированного состояния балок. Рассмотрим плиту (рис.8 а), опертую по трапециевидному контуру. Поперечную нагрузку обозначим через $q(x_1, x_2)$. Плита имеет только одну дискретную упруго-податливую опору с коэффициентом жесткости

$$d_{11} = d_{21} = \mathbf{0}, \quad \tau_{31} = \mathbf{0}.$$

Перейдем к основной системе (рис.8 б), в которой дискретная опора уже отсутствует. Заменим реакцию опоры неизвестной X_1 (рис.8 в – разрез плиты). Тогда дифференциальное уравнение (2) в основной системе (рис.8 б, 8 в) запишем в виде

$$T_1^0 \cdot \frac{\partial^4 W_3}{\partial x_1^4} + T_2^0 \cdot \frac{\partial^4 W_3}{\partial x_2^4} + (T_1^0 + T_2^0) \cdot \frac{\partial^4 W_3}{\partial x_1^2 \partial x_2^2} = q(x_1, x_2) - X_1 \cdot \delta(x_1 - \xi_1) \cdot \delta(x_2 - \eta_1),$$

где ξ_1, η_1 – координаты опоры в основной системе.

Как и ранее, функцию Грина $G(x_1, \bar{x}_1, x_2, \bar{x}_2)$ для плиты в основной системе считаем известной: она строится, с учетом граничных условий плиты на контуре, по известным алгоритмам, [2,4]. Тогда предыдущее уравнение можем представить так:

$$W_3(x_1, x_2) = \iint_{\Omega} G(x_1, \bar{x}_1, x_2, \bar{x}_2) \times \times [q(\bar{x}_1, \bar{x}_2) - X_1 \cdot \delta(\bar{x}_1 - \xi_1) \cdot \delta(\bar{x}_2 - \eta_1)] d\bar{x}_1 d\bar{x}_2. \quad (13)$$

$$\text{или } W_3(x_1, x_2) = \bar{W}_3(x_1, x_2) - X_1 \cdot G(x_1, \xi_1, x_2, \eta_1), \quad (14)$$

$$\text{где } \bar{W}_3(x_1, x_2) = \iint_{\Omega} G(x_1, \bar{x}_1, x_2, \bar{x}_2) \cdot q(\bar{x}_1, \bar{x}_2) d\bar{x}_1 d\bar{x}_2. \quad (15)$$

Для определения неизвестного X_1 , входящего в выражение (14), запишем условие работы дискретной опоры: $W_3(\xi_1, \eta_1) = \frac{X_1}{r_{31}}$. (16)

Подставляя в последнее равенство функцию (14), получаем

$$W_3(\xi_1, \eta_1) = X_1 \cdot G(\xi_1, \xi_1, \eta_1, \eta_1) = \frac{X_1}{r_{31}}. \quad (17)$$

Отсюда

$$X_1 = \frac{W_3(\xi_1, \eta_1)}{G(\xi_1, \xi_1, \eta_1, \eta_1) + \frac{1}{r_{31}}}. \quad (18)$$

Внося найденное значение неизвестного (18) в правую часть равенства (14), окончательно получаем

$$W_3(x_1, x_2) = \bar{W}_3(x_1, x_2) - \frac{W_3(\xi_1, \eta_1)}{G(\xi_1, \xi_1, \eta_1, \eta_1) + \frac{1}{r_{31}}} \cdot G(x_1, \xi_1, x_2, \eta_1).$$

где ξ_1, η_1 – координаты дискретной опоры в основной системе (рис.8 б).

При $r_{31} \rightarrow \infty$ упруго-податливая опора становится абсолютно жесткой, а функция (19) принимает вид

$$W_3(x_1, x_2) = \bar{W}_3(x_1, x_2) - \frac{\bar{W}_3(\xi_1, \eta_1)}{G(\xi_1, \xi_1, \eta_1, \eta_1)} \cdot G(x_1, \xi_1, x_2, \eta_1). \quad (20)$$

При $r_{31} \rightarrow 0$ упруго-податливая опора «исчезает», то есть опора не оказывает сопротивления прогибам плиты. Для этого случая выражение (19) записывается так:

$$\begin{aligned} W_3(x_1, x_2) &= \bar{W}_3(x_1, x_2) - \lim_{r_{31} \rightarrow 0} \frac{\bar{W}_3(\xi_1, \eta_1)}{G(\xi_1, \xi_1, \eta_1, \eta_1)} \cdot G(x_1, \xi_1, x_2, \eta_1) = \\ &= \bar{W}_3(x_1, x_2) - \frac{\bar{W}_3(\xi_1, \eta_1)}{G(\xi_1, \xi_1, \eta_1, \eta_1) + \infty} \cdot G(x_1, \xi_1, x_2, \eta_1) = \bar{W}_3(x_1, x_2). \end{aligned} \quad (21)$$

Мы получили функцию прогибов (21) плиты в основной системе, когда отсутствует дискретная опора. Если в подынтегральном выражении (15) принять

$$q(x_1, x_2) = \delta(x_1 - \tilde{x}_1) \cdot \delta(x_2 - \tilde{x}_2),$$

то функция прогибов (19) «перейдет» в функцию Грина $\bar{G}(x_1, \bar{x}_1, x_2, \bar{x}_2)$ для плиты с дискретной опорой:

$$d_{11} = d_{21} = 0, \quad r_{31} \neq 0 \text{ — предыдущая задача.}$$

В самом деле, заменив нагрузку q дельта-функцией, из (15) получим:

$$\begin{aligned} \bar{W}_3(x_1, x_2) &= \iint_{\Omega} G(x_1, \bar{x}_1, x_2, \bar{x}_2) \cdot \delta(\tilde{x}_1 - \bar{x}_1) \cdot \delta(\tilde{x}_2 - \bar{x}_2) \times \\ &\quad \times d\tilde{x}_1 d\tilde{x}_2 = G(x_1, \bar{x}_1, x_2, \bar{x}_2). \end{aligned}$$

Подставив последнюю функцию в равенство (19), будем иметь

$$\begin{aligned} \bar{W}_3(x_1, x_2) &= \bar{G}(x_1, \bar{x}_1, x_2, \bar{x}_2) = G(x_1, \bar{x}_1, x_2, \bar{x}_2) - \\ &- \frac{G(\xi_1, \bar{x}_1, \eta_1, \bar{x}_2)}{G(\xi_1, \xi_1, \eta_1, \eta_1) + \frac{1}{r_{31}}} \cdot G(x_1, \xi_1, x_2, \eta_1). \end{aligned} \quad (22)$$

Построенная функция Грина (22) соответствует плите с дискретной опорой:

$$d_{11} = d_{21} = 0, \quad r_{31} \neq 0.$$

Таким образом, мы получили новую функцию Грина \bar{G} на базе «старой» G . Последняя соответствует плите, опертой по контуру (в основной системе, рис. 8 б), когда отсутствует дискретная опора. Такой способ построения функции называется рекуррентным: от простого случая последовательно переходим к сложному.

Мы рассмотрели простейший случай. Усложним задачу. Введем дополнительно еще одну связь для дискретной опоры. Коэффициенты жесткости, следующие: $d_{11} = d_{21} = 0$, $r_{31} \neq 0$. Координаты опоры: ξ_1, η_1 (рис.8). Воспользуемся функцией Грина (22). Связь дискретной опоры заменим соответствующими реакциями. Тогда поперечная нагрузка

$$\begin{aligned} \bar{q}(x_1, x_2) &= q(x_1, x_2) - X_1 \cdot \delta(x_1 - \xi_1) \cdot \delta(x_2 - \eta_1) + \\ &+ X_2 \cdot \delta(x_1 - \xi_1) \cdot \delta'_{x_2}(x_2 - \eta_1). \end{aligned} \quad (23)$$

Здесь: X_1 — реакция дискретной опоры (сила) при прогибах плиты; X_2 — реакция дискретной опоры (момент) при поворотах сечения плиты по оси x_2 (на рис.8 в эта реакция не показана). Знаки при неизвестных X_1, X_2 можно принять любые. Знаки X_1 мы сохранили здесь как в предыдущей задаче. Теперь уравнение изгиба плиты можем записать так:

$$\begin{aligned} T_1^0 \cdot \frac{\partial^4 W_3}{\partial x_1^4} + T_2^0 \cdot \frac{\partial^4 W_3}{\partial x_2^4} + (T_1^0 + T_2^0) \cdot \frac{\partial^4 W_3}{\partial x_1^2 \partial x_2^2} + \\ + X_1 \cdot \delta(x_1 - \xi_1) \cdot \delta(x_2 - \eta_1) = \\ = q(x_1, x_2) + X_2 \cdot \delta(x_1 - \xi_1) \cdot \delta'_{x_2}(x_2 - \eta_1), \end{aligned} \quad (24)$$

где функция Грина \bar{G} для оператора, находящегося в левой части равенства, определена выражение (22).

Тогда

$$\begin{aligned} \bar{W}_3(x_1, x_2) &= \iint_{\Omega} G(x_1, \bar{x}_1, x_2, \bar{x}_2) \times \\ &\times [q(\bar{x}_1, \bar{x}_2) + X_2 \cdot \delta(\bar{x}_1 - \xi_1) \cdot \delta'_{\bar{x}_2}(\bar{x}_2 - \eta_1)] d\bar{x}_1 d\bar{x}_2; \end{aligned} \quad (25)$$

или

$$W_3(x_1, x_2) = \tilde{W}_3(x_1, x_2) + X_2 \frac{\partial G(x_1, \bar{x}_1, x_2, \bar{x}_2)}{\partial \bar{x}_2} \Bigg|_{\substack{\bar{x}_1 = \xi_1 \\ \bar{x}_2 = \eta_1}}, \quad (25 \text{ a})$$

$$\text{где } \tilde{W}_3(x_1, x_2) = \iint_{\Omega} \bar{G}(x_1, \bar{x}_1, x_2, \bar{x}_2) \cdot q(\bar{x}_1, \bar{x}_2) d\bar{x}_1 d\bar{x}_2.$$

Если ввести обозначения типа (8)

$$\frac{\partial \bar{G}(x_1, \bar{x}_1, x_2, \bar{x}_2)}{\partial \bar{x}_2} \Bigg|_{\substack{\bar{x}_1 = \xi_1 \\ \bar{x}_2 = \eta_1}} = \frac{\partial \bar{G}(x_1, \xi_1, x_2, \eta_1)}{\partial \bar{x}_2}, \quad (26)$$

то функцию прогибов (25) можно представить в виде

$$W_3(x_1, x_2) = \tilde{W}_3(x_1, x_2) + X_2 \cdot \frac{G(x_1, \xi_1, x_2, \eta_1)}{\partial \bar{x}_2}. \quad (27)$$

Для определения неизвестного X_2 запишем условие работы дискретной опоры при ее повороте по оси x_2 :

$$\frac{\partial W_3(x_1, x_2)}{\partial x_2} \Bigg|_{\substack{\bar{x}_1 = \xi_1 \\ \bar{x}_2 = \eta_1}} = \frac{X_2}{d_{21}}. \quad (28)$$

Подставляя функцию (27) в равенство (28), получаем уравнение

$$\frac{\partial \tilde{W}_3(x_1, x_2)}{\partial x_2} \Bigg|_{\substack{\bar{x}_1 = \xi_1 \\ \bar{x}_2 = \eta_1}} + X_2 \cdot \frac{\partial^2 \bar{G}(x_1, \bar{x}_1, x_2, \bar{x}_2)}{\partial \bar{x}_2 \partial x_2} \Bigg|_{\substack{\bar{x}_1 = \xi_1 \\ \bar{x}_2 = \eta_1 \\ x_2 = \eta_1 \\ x_1 = \xi_1}} = \frac{X_2}{d_{21}}.$$

Если ввести обозначения в виде (26), то предыдущее уравнение можно представить компактно:

$$\frac{\partial \tilde{W}_3(\xi_1, \eta_1)}{\partial x_2} + X_2 \cdot \frac{\partial^2 G(\xi_1, \xi_1, \eta_1, \eta_1)}{\partial \bar{x}_2 \partial x_2} = \frac{X_2}{d_{21}}. \quad (29)$$

Отсюда

$$X_2 = - \frac{\frac{\partial \tilde{W}_3(\xi_1, \eta_1)}{\partial x_2}}{\frac{\partial^2 G(\xi_1, \xi_1, \eta_1, \eta_1)}{\partial \bar{x}_2 \partial x_2}} + \frac{1}{d_{21}}.$$

Внося найденное значение неравенства в равенство (27), окончательно имеем

$$W_3(x_1, x_2) = \tilde{W}_3(x_1, x_2) - \quad (30)$$

$$- \frac{\frac{\partial \tilde{W}_3(\xi_1, \eta_1)}{\partial x_2}}{\frac{1}{d_{21}} - \frac{\partial^2 G(\xi_1, \xi_1, \eta_1, \eta_1)}{\partial \bar{x}_2 \partial x_2}} \cdot \frac{\partial \bar{G}(x_1, \xi_1, x_2, \eta_1)}{\partial \bar{x}_2}.$$

Здесь: $\bar{G} = \bar{G}(x_1, \bar{x}_1, x_2, \bar{x}_2)$ – функция (22); производные прогибов \tilde{W}_3 определяются на основе интеграла, например,

$$\begin{aligned} \frac{\partial \tilde{W}_3(\xi_1, \eta_1)}{\partial x_2} &= \frac{\partial \tilde{W}_3(x_1, x_2)}{\partial x_2} \Bigg|_{\substack{\bar{x}_1 = \xi_1 \\ \bar{x}_2 = \eta_1}} = \\ &= \iint_{\Omega} \frac{\partial \bar{G}(x_1, \bar{x}_1, x_2, \bar{x}_2)}{\partial x_2} \Bigg|_{\substack{\bar{x}_1 = \xi_1 \\ \bar{x}_2 = \eta_1}} \cdot q(\bar{x}_1, \bar{x}_2) d\bar{x}_1 d\bar{x}_2. \end{aligned} \quad (30 \text{ a})$$

Мы получили функцию прогибов (30) (в основной системе, рис.8б) ортотропной плиты, когда дискретная опора имеет коэффициенты жесткости:

$$d_{11} = 0, \quad d_{21} \neq 0, \quad r_{31} \neq 0.$$

Если в подынтегральном выражении (25 а) распределенную нагрузку q заменить дельта-функцией, то равенством (30) определяется функция Грина, соответствующая плите с дискретной опорой, у которой

$$d_{11} = 0, \quad d_{21} \neq 0, \quad r_{31} \neq 0.$$

На основе этой новой функции Грина нетрудно построить следующую функцию для случая дискретной опоры с $d_{11} \neq 0, \quad d_{21} \neq 0, \quad r_{31} \neq 0$; или для случая двух опор. При рекуррентном способе построения функции Грина, нам бывает достаточно каждый раз решать уравнение только с одним неизвестным (см. уравнения 17, 29). При использовании современных компьютеров задача решается и «в лоб», то есть в два этапа. На первом этапе строится функция Грина для ортотропной плиты с учетом ее условий крепления по внешнему и внутреннему контуру, в предположении отсутствия дискретных опор. На втором этапе такая плита принимается за основную систему. Затем, в основной системе, на базе уже известной функции Грина, решается задача с учетом сразу всех дискретных опор.

Обсуждение результатов. Ортотропная плита, изображенную на рис. 9, имеет в плане прямоугольный контур. Кроме этого параллельно оси x_1 (рис. 9) имеются опоры в виде стен или пилонов: η_1, η_2, η_3 – координаты опор (на рисунке эти опоры показаны пунктиром). На плиту действует поперечная нагрузка $q(x_1, x_2)$.

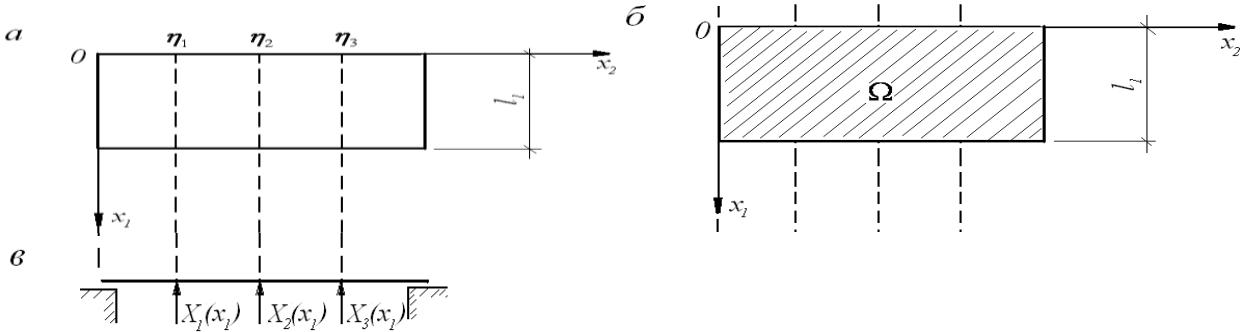


Рис. 9 - Плита на поперечных стенах с односторонними связями

Fig. 9 - Slab on transverse walls with one-sided ties

Дифференциальное уравнение поперечного изгиба ортотропной плиты записывается в виде:

$$\begin{aligned} T_1^0 \cdot \frac{\partial^4 G^0}{\partial x_1^4} + T_2^0 \cdot \frac{\partial^4 G^0}{\partial x_2^4} + (T_1^0 + T_2^0) \cdot \frac{\partial^4 G^0}{\partial x_1^2 \partial x_2^2} = \\ = q(x_1, x_2) - X_1(x_1) \cdot \delta(x_2 - \eta_1) - \\ - X_2(x_1) \cdot \delta(x_2 - \eta_2) - X_3(x_1) \cdot \delta(x_2 - \eta_3). \end{aligned} \quad (31)$$

Здесь $X_1(x_1), X_2(x_1), X_3(x_1)$ – функции отпора, которые возникают вдоль пилонов. На рис. 9 б, 9 в приведена основная система (план и разрез плиты). В случае, когда поперечные стены обладают свойством односторонних связей, уравнение (31) принимает вид:

$$\begin{aligned} = q(x_1, x_2) - X_1(x_1) \cdot \delta(x_2 - \eta_1) \cdot e[w(x_1, \eta_1)] - \\ - X_2(x_1) \cdot \delta(x_2 - \eta_2) \cdot e[w(x_1, \eta_2)] - X_3(x_1) \cdot \delta(x_2 - \eta_3) \cdot e[w(x_1, \eta_3)]. \end{aligned} \quad (31 \text{ a})$$

$$T_1^0 \cdot \frac{\partial^4 G^0}{\partial x_1^4} + T_2^0 \cdot \frac{\partial^4 G^0}{\partial x_2^4} + (T_1^0 + T_2^0) \cdot \frac{\partial^4 G^0}{\partial x_1^2 \partial x_2^2} =$$

Далее введем функцию Грина $G(x_1, \bar{x}_1, x_2, \bar{x}_2)$, которая удовлетворяет условиям креп-

ленияя плиты по контуру в основной системе (где уже нет промежуточных стен, рис. 9 б). Тогда дифференциальное уравнение (31а) можем представить в интегральной форме:

$$W_3(x_1, x_2) = \iint_{\Omega} G(x_1, \bar{x}_1, x_2, \bar{x}_2) \cdot [q(\bar{x}_1, \bar{x}_2) - [X_1(x_1) \cdot \delta(x_2 - \eta_1) \cdot e[w(x_1, \eta_1)] + X_2(x_1) \cdot \delta(x_2 - \eta_2) \cdot e[w(x_1, \eta_2)] + X_3(x_1) \cdot \delta(x_2 - \eta_3)] \cdot e[w(x_1, \eta_1)] d x_1 d x_2]. \quad (32)$$

где Ω — область плиты, рис. 9 б.

Если ввести обозначение

$$W_3(x_1, x_2) = \iint_{\Omega} G(x_1, x_1, x_2, x_2) \cdot q(x_1, x_2) d x_1 d x_2. \quad (33)$$

и раскрыть интегралы, то уравнение (32) можно записать в более удобном виде:

$$\begin{aligned} W_3(x_1, x_2) = & W_3(x_1, x_2) - \\ & - \int_0^{l_1} G(x_1, \bar{x}_1, x_2, \eta_1) \cdot X_1(\bar{x}_1) e[W_3(\bar{x}_1, \eta_1)] d \bar{x}_1 - \\ & - \int_0^{l_1} G(x_1, \bar{x}_1, x_2, \eta_2) \cdot X_2(\bar{x}_1) e[W_3(\bar{x}_1, \eta_2)] d \bar{x}_1 - \\ & - \int_0^{l_1} G(x_1, x_1, x_2, \eta_3) \cdot X_3(x_1) e[W_3(x_1, \eta_3)] d x_1. \end{aligned} \quad (33 \text{ a})$$

Здесь: G — функция Грина, которая для плиты в основной системе (рис. 9 б), l_1

— размер плиты по оси x_1 . Уравнение (33 а) решается методом итераций.

Далее запишем условия работы опор: предположим, что плита, опираясь на стены, может совершать повороты, но не может прогнуться на опорах. Поэтому вдоль стен (или пилонов) имеем

$$\begin{cases} W_3(x_1, \eta_1) = 0, \\ W_3(x_1, \eta_2) = 0, \\ W_3(x_1, \eta_3) = 0. \end{cases} \quad (34)$$

Подставляя в равенства (34) функцию прогибов (33 а), получаем

$$\begin{aligned} \int_0^{l_1} G(x_1, x_1, \eta_1, \eta_1) \cdot X_1(x_1) e[W_3(x_1, \eta_1)] d x_1 + \\ + \int_0^{l_1} G(x_1, x_1, \eta_1, \eta_2) \cdot X_2(x_1) e[W_3(x_1, \eta_2)] d x_1 + \\ \int_0^{l_1} G(x_1, x_1, \eta_1, \eta_3) \cdot X_3(x_1) e[W_3(x_1, \eta_3)] d x_1 = W_3(x_1, \eta_1); \end{aligned} \quad (35)$$

$$\begin{aligned} \int_0^{l_1} G(x_1, \bar{x}_1, \eta_2, \eta_1) \cdot X_1(\bar{x}_1) e[W_3(\bar{x}_1, \eta_1)] d \bar{x}_1 + \\ + \int_0^{l_1} G(x_1, \bar{x}_1, \eta_2, \eta_2) \cdot X_2(\bar{x}_1) e[W_3(\bar{x}_1, \eta_2)] d \bar{x}_1 + \\ \int_0^{l_1} G(x_1, \bar{x}_1, \eta_2, \eta_3) \cdot X_3(\bar{x}_1) e[W_3(\bar{x}_1, \eta_3)] d \bar{x}_1 = W_3(x_1, \eta_2); \end{aligned} \quad (36)$$

$$\begin{aligned} \int_0^{l_1} G(x_1, \bar{x}_1, \eta_3, \eta_1) \cdot X_1(\bar{x}_1) e[W_3(\bar{x}_1, \eta_1)] d \bar{x}_1 + \\ + \int_0^{l_1} G(x_1, \bar{x}_1, \eta_3, \eta_2) \cdot X_2(\bar{x}_1) e[W_3(\bar{x}_1, \eta_2)] d \bar{x}_1 + \\ \int_0^{l_1} G(x_1, \bar{x}_1, \eta_3, \eta_3) \cdot X_3(\bar{x}_1) e[W_3(\bar{x}_1, \eta_3)] d \bar{x}_1 = W_3(x_1, \eta_3); \end{aligned} \quad (37)$$

Из системы трех линейных интегральных уравнений (35), (36), (37) определяются три неизвестные функции $X_1(x_1)$, $X_2(x_1)$, $X_3(x_1)$. Для решения этих уравнений можно применить различные методы. Если известна функция Грина

$G(x_1, \bar{x}_1, x_2, \bar{x}_2)$ или нетрудно ее представить в виде билинейного ряда, то удобно пользоваться методом вырожденных ядер. Когда функция Грина строится численными методами для плит, опертых по сложному контуру, то мы располагаем лишь массивом чисел в виде значений

$$G(z_i, z_j, y_i, y_j) = G(x_1, \bar{x}_1, x_2, \bar{x}_2) \quad \left| \begin{array}{l} x_1 = z_i \\ \bar{x}_1 = z_j \\ x_2 = y_i \\ \bar{x}_2 = y_j \end{array} \right. \quad (38)$$

где $i, j = 1, 2, 3, 4 \dots$ - порядковые номера точек, которыми покрываются область плиты, включая контурные точки; z_i и y_i - координаты i -ой точки соответственно по осям x_1 и x_2 (рис. 10).

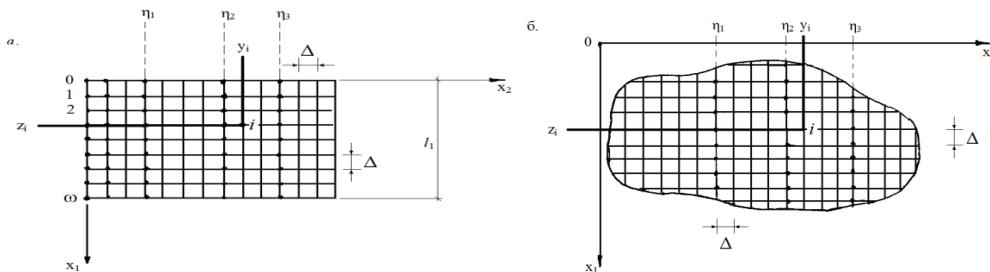


Рис. 10 - Координаты системы коллокаций
 Fig. 10 - Coordinates of the collocation system

Воспользуемся методом коллокаций. В уравнениях (35), (36), (37) заменим знаки интегралов суммами, а дифференциал $d\bar{x}_1$ - малым отрезком Δ (Δ - размер ячейки сетки; рис. 10). Тогда получим

$$\Delta \cdot \sum_j [G(z_i, z_j, \eta_1, \eta_1) \cdot X_1(z_j) + G(z_i, z_j, \eta_1, \eta_2) \cdot X_2(z_j) + G(z_i, z_j, \eta_1, \eta_3) \cdot X_3(z_j)] = \bar{W}_3(z_i, \eta_1); \quad (39)$$

$$\Delta \cdot \sum_j [G(z_i, z_j, \eta_2, \eta_1) \cdot X_1(z_j) + G(z_i, z_j, \eta_2, \eta_2) \cdot X_2(z_j) + G(z_i, z_j, \eta_2, \eta_3) \cdot X_3(z_j)] = \bar{W}_3(z_i, \eta_2); \quad (40)$$

$$\Delta \cdot \sum_j [G(z_i, z_j, \eta_3, \eta_1) \cdot X_1(z_j) + G(z_i, z_j, \eta_3, \eta_2) \cdot X_2(z_j) + G(z_i, z_j, \eta_3, \eta_3) \cdot X_3(z_j)] = \bar{W}_3(z_i, \eta_3). \quad (41)$$

Здесь j пробегает по всем точкам, соответствующим расположению пилонов. В случае прямоугольной плиты (рис. 10 а) координаты z_j и число точек j по оси x_1 - будут для всех пилонов одинаковыми. Поэтому знаки суммы, входящие в предыдущие уравнения, принятые общие для всех неизвестных; в случае плиты с криволинейным контуром (рис. 10 б), нам пришлось бы записывать знаки суммы при каждом неизвестном X_k отдельно, поскольку пилоны (стены, параллельные оси X) имели бы разную длину, соответственно разное число точек j и разные координаты z_j .

При каждом фиксированном значении i из равенств (39), (40), (41) вытекает три строки, три уравнения. Очевидно, если дискретные точки $j = 0, 1, 2, 3 \dots \omega$ ($\Delta = l_1/\omega$, l_1 - длина плиты по оси x_1 ; $j = 0, 1, 2, 3 \dots \omega$ - точки, лежащие на контурах - рис. 12 а), то число уравнений в системе (39), (40), (41) будет равно $3(\omega + 1)$, столько же будет и число неизвестных $X_1(z_j), X_2(z_j), X_3(z_j)$. Таким образом, формируется система линейных

уравнений $3(\omega + 1) - 2\omega$ порядка. Из этой системы определяются неизвестные $X_1(z_j)$, $X_2(z_j)$, $X_3(z_j)$, то есть определяются функции $X_1(x_1)$, $X_2(x_1)$, $X_3(x_1)$ в виде численных массивов. Функция прогибов неразрезной плиты вычисляется с помощью выражения (33 а). Заменяя интегралы суммами, функцию (33) представим так:

$$\begin{aligned} W_3(Z_i, y_j) = \bar{W}_3(Z_i, y_j) - \sum_{j=0}^{\omega} [G(z_i, z_j, y_i, \eta_1) \cdot X_1(z_j) + \\ + G(z_i, z_j, y_i, \eta_2) \cdot X_2(z_j) + \\ + G(z_i, z_j, y_i, \eta_3) \cdot X_3(z_j)]. \end{aligned} \quad (42)$$

где: z_i , z_j – координаты по оси x_1 соответственно точки i и точки j ; y_i – координаты по оси x точки i ; η_1, η_2, η_3 – координаты по оси x_2 пилонов (рис. 9 а, 10 а). На основе функции прогибов (42) по формулам (12а) (при $\bar{T}_1 = T_1^0$, $\bar{T}_2 = T_2^0$, $W_1 = W_2 = 0$) вычисляются внутренние усилия рассматриваемой неразрезной плиты. Поступая аналогично, можно построить алгоритмы расчета неразрезных плит, когда промежуточные опоры (стены, колонны) имеют в плане произвольную конфигурацию.

Вывод. Рассмотрены конструктивные схемы плит с односторонними связями, которые находят широкое применение в практике строительства. Приведены дискретные опоры плит, обладающие свойством односторонних связей. Приведены соответствующие схемы, а также аналитические выражения, описывающие особенности работы односторонних связей. Приводятся расчетные модели плит, которые лежат на опорах с односторонними связями. Представлены соответствующие расчетные схемы, дифференциальные и интегральные уравнения поперечного изгиба плит на опорах с односторонними связями.

Разработаны алгоритмы решения дифференциальных и интегральных уравнений, которые описывают работу плит с односторонними связями. Для иллюстрации алгоритма решения рассматриваются различные частные примеры. Приведенные расчетные модели плит с односторонними связями могут найти широкое применение при проектировании пластинчатых конструкций, имеющих опоры с односторонними связями.

Библиографический список:

1. Айзенберг Я.М. Сооружения с выключающимися связями для сейсмических районов. Стройиздат. М. 1976 г.
2. Вайнберг М.М. Вариационные методы исследования нелинейных операторов. «Наука». М., 1969 г.
3. Губер М.Т. Теория Плана; Львов, 1922г.
4. Демидович Б.П., Марон И.А., Шувалова Э.З. Численные методы анализа. Издательство «Наука», Москва, 1967г., 368 стр.
5. Доннель Л.Г. Балки, пластины и оболочки. Издательство «Наука», Москва, 1982г., 567 стр.
6. Лехницкий С.Г. Анизотропные пластиинки. Издательство литературы по строительству; Москва, 1957г., с.40.
7. Тимашенко С.П., Войновский-Кригер С. Пластиинки и оболочки Издательство «Наука», Москва, 1966г., 635 стр.
8. СП 16.13330.2017 «Стальные конструкции». Свод правил – Москва, строийиздат, 2017г. – 126 с.
9. СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия». Свод правил – Москва, строийиздат, 2016. – 95 с.,
10. А.К. Юсупов, Х.М. Муселемов, Р.И. Вишталов. Расчетные модели балок с односторонними связями. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2024; 51(4): 236-248. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-4-236-248

References:

1. Ayzenberg Ya.M. Structures with switching connections for seismic regions. Stroyi Publishing House. Moscow, 1976 (In Russ)

2. Weinberg M.M. Variational methods for studying nonlinear operators. "Science". Moscow, 1969
3. Guber M.T. Theorya Plyt; Lvov, 1922 (In Russ)
4. Demidovich B.P., Maron IA., Shuvalova E.Z. Numerical methods of analysis. "Science" Publishing House, Moscow, 1967: 368. (In Russ)
5. Donnel L.G. Beams, plates and shells. "Science" Publishing House, Moscow, 1982:567. (In Russ)
6. Lekhnitsky S.G. Anisotropic plates. Publishing house of literature on construction; Moscow, 1957:40 (In Russ)
7. Timashenko S.P., Voynovsky-Krieger S. Plates and shells Publishing house "Science", Moscow, 1966:635 (In Russ)
8. SP 16.13330.2017 "Steel structures". Code of rules - Moscow, Stroyizdat, 2017:126. (In Russ)
9. SP 20.13330.2016 "Loads and impacts". Code of rules - Moscow, Stroyizdat, 2016: 95 (In Russ)
10. A.K. Yusupov, Kh.M. Muselemov, R.I. Vishtalov. Calculation models of beams with one-way connections. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2024;51(4):236-248. DOI:10.21822 /2073-6185-2024-51-4-236-248 (In Russ)

Сведения об авторах:

Юсупов Абусупян Курашевич, доктор технических наук, профессор, кафедра «Строительные конструкции и гидротехнические сооружения»; hairulla213@mail.ru

Муселемов Хайрулла Магомедмурадович, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Строительные конструкции и гидротехнические сооружения»; hairulla213@mail.ru

Вишталов Раджаб Исабекович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительные конструкции и гидротехнические сооружения»; hairulla213@mail.ru

Information about the authors:

Abusupyan K.Yusupov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Department of Building Structures and Hydraulic Structures; hairulla213@mail.ru

Hairulla M.Muselemov, Dr. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Head of the Department of Building Structures and Hydraulic Structures; hairulla213@mail.ru

Rajab I. Vishtalov, Cand.Sci. (Eng.), Assoc. Prof. Department of Building Structures and Hydro-technical Structures; hairulla213@mail.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 01.10.2024.

Одобрена после рецензирования/ Reviced 30.11.2024.

Принята в печать/Accepted for publication 14.01. 2025.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 624.04

DOI: 10.21822/2073-6185-2025-51-4-242- 250



Оригинальная статья /Original article

**Вариационно-разностный подход в расчете трехслойной балки
с учетом ползучести среднего слоя**

Б.М. Языев¹, С.В. Литвинов¹, Е.В. Виноградова², М.А. Магомедов³

¹Донской государственный технический университет,

¹344003, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина 1, Россия,

²Российский университет дружбы народов им. П. Лумумбы,

²115419, Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3, Россия,

³Дагестанский государственный технический университет,

³367015, г. Махачкала, проспект И. Шамиля, 70, Россия

Резюме. Цель. В статье приводится методика расчета трехслойной балки с легким заполнителем с учетом ползучести среднего слоя. Представлено существенное развитие деформаций с течением времени под действием постоянной нагрузки. **Метод.** Исследуется шарнирно опертая по концам балка под действием равномерно распределенной нагрузки, решение осуществляется при помощи вариационно-разностного метода. В качестве закона ползучести используется линейное уравнение Максвелла-Томпсона. Для вычисления скорости роста высокоэластических деформаций использовался метод Эйлера и Рунге-Кутта. **Результат.** Проведен графический анализ изменения во времени напряжений и деформаций. Установлено, что соотношение упругой и деформации ползучести в разные моменты времени существенно различно. Разработана программа для расчета в пакете MATLAB с возможностью вариации исходных данных и выводом графика зависимости перемещений, изгибающего момента от времени. Представлено сравнение максимальной величины прогиба в упругой стадии (в начальный момент времени) с решением в программном комплексе ЛИРА САПР. Отмечено, что напряжения практически не меняются в процессе ползучести. **Вывод.** Предложенный подход может быть применен к анализу напряженно-деформированного состояния и несущей способности для сэндвич панелей произвольного сечения. Ограничений по граничным условиям и вида нагрузления нет, а материалом несущих слоев балки может быть не только металл, но и другой материал, в частности, композит.

Ключевые слова: ползучесть, относительная деформация, уравнение состояния, изгибающие моменты, переменная жесткость, слоистые балки, вариационно-разностный метод, перемещения угловые; многослойные элементы конструкции; теория вязкоупругости; механика полимеров

Для цитирования: Б.М. Языев, С.В. Литвинов, Е.В. Виноградова, М.А. Магомедов. Вариационно-разностный подход в расчете трехслойной балки с учетом ползучести среднего слоя. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025;52(1):242-250. DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-1-242-250

**Variational-difference Approach to calculation of a Three-layer beam taking into account
the creep of the middle layer**

В.М. Языев¹, С.В. Литвинов¹, Е.В. Виноградова², М.А. Магомедов³

¹Don State Technical University,

¹1 Gagarin Square, Rostov-on-Don 344003, Russia,

²P.Lumumba Peoples' Friendship University of Russia,

²3 Ordzhonikidze St., Moscow 115419, Russia,

³Daghestan State Technical University,

³70 I. Shamilya Ave., Makhachkala 367015, Russia

Abstract. Objective. This article presents a calculation method for a three-layer beam with lightweight filler taking into account the creep of the middle layer. A significant development of deformations over time under a constant load is presented. **Method.** A beam hinged at the ends is investigated under a uniformly distributed load; the solution is carried out using the variational-difference method. The linear Maxwell-Thompson equation is used as the creep law. The Euler and Runge-Kutta methods are used to calculate the growth rate of highly elastic deformations. **Result.** A graphical analysis of changes in stresses and deformations over time is presented. It is found that the ratio of elastic and creep deformations at different points in time varies significantly. A program has been developed for calculations in the MATLAB package with the ability to vary the initial data and output a graph of the dependence of displacements and bending moment on time. A comparison of the maximum deflection in the elastic stage (at the initial moment of time) with the solution in the LIRA SAPR software package is presented. It is noted that the stresses remain virtually unchanged during creep. **Conclusion.** The proposed approach can be applied to the analysis of the stress-strain state and bearing capacity for any sandwich panels of arbitrary cross-section. There are no restrictions on the boundary conditions and type of loading, and the material of the beam's bearing layers can be not only metal, but also any other material, in particular, composite.

Keywords: creep, relative deformation, equation of state, bending moments, variable stiffness, layered beams, variational-difference method, angular displacements; multilayer structural elements; viscoelasticity theory; polymer mechanics

For citation: B.M. Yazyev, S.V. Litvinov, E.V. Vinogradova, M.A Magomedov. Variational-difference Approach to calculation of a Three-layer beam taking into account the creep of the middle layer. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2025;52(1): 242-250. (In Russ) DOI:10.21822 /2073-6185-2025-52-1-242-250

Введение. Классические методики расчета таких конструкций часто направлены на определение несущей способности только одного слоя, выполненного из металла, дерева, железобетона или композиционного материала. Различные конструктивные решения многослойных элементов рассматривают возможность влияния слоя утеплителя на несущую способность конструкции в целом [1-7]. При этом слой утеплителя рассматривается внутри «сэндвича». На сегодняшний день вопрос расчета многослойных конструкций актуален, так как в рамках повышения энергосбережения зданий такие элементы используется как в вертикальных, так и горизонтальных конструкциях. Изделия, в состав которых входят полимеры, в большей степени, чем многие другие строительные материалы, подвержены ползучести. Поскольку средний слой трехслойных панелей часто изготавливается из пенопластов, указанное свойство необходимо учитывать при проектировании. Учет ползучести сопряжен с решением сложных систем интегро-дифференциальных уравнений [8-10], что значительно препятствует использованию аппарата теории ползучести в практике инженерных расчетов.

Постановка задачи. В настоящей статье приводится сравнительно простой метод расчета трехслойной балки с учетом ползучести ВРМ, который может быть применен в инженерной практике. Идея ВРМ [11-13] состоит в замене вариационной задачи ее дискретным аналогом в сеточной области — т. е. искомая непрерывная функция, входящая в выражение полной потенциальной энергии системы, определяется дискретно, на некотором множестве узлов. При формировании системы алгебраических уравнений исходный функционал энергии, записанный для всей области, заменяется некоторой конечной суммой, а входящие в него производные — конечными разностями. Матрица коэффициентов системы разрешающих уравнений ВРМ получается симметричной, хорошо обусловленной и имеет ленточную структуру.

Рассмотрим трехслойную балку с полимерным заполнением среднего слоя шарнирно-опертуру по концам. Балка, подверженная действию равномерно распределенной

нагрузкой q (рис.1). Сечение вдоль балки до деформации приведен на (рис. 2). Обозначим толщину внешних несущих слоев через δ , а толщину заполнителя через $(h - \delta)$. При построении теории будем пользоваться следующими гипотезами [16]:

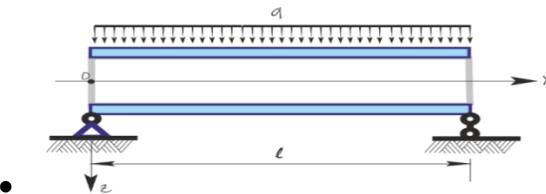


Рис. 1 - Расчетная схема трехслойной балки.
 Fig.1 - Calculation scheme of a three-layer beam.

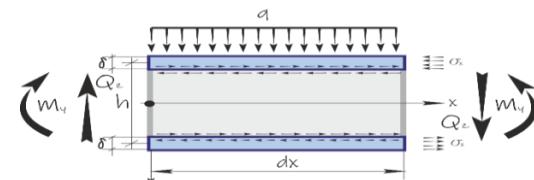


Рис. 2 - Сечение вдоль трехслойной балки до деформации
 Fig. 2 - Cross-section along a three-layer beam before deformation

Изгибающий момент $M_y(x)$ воспринимается верхним и нижним упругим слоем, а также вязкоупругим слоем заполнителя (рис.3).

Толщина заполнителя намного больше толщины несущих слоев, т.е. $(h - \delta) > 2\delta$. Модули упругости заполнителя значительно меньше модулей упругости несущих слоев, вследствие чего обычно пренебрегают нормальными напряжениями, возникающими в заполнителе, но мы делать этого не будем. Перерезывающие силы воспринимаются только заполнителем.

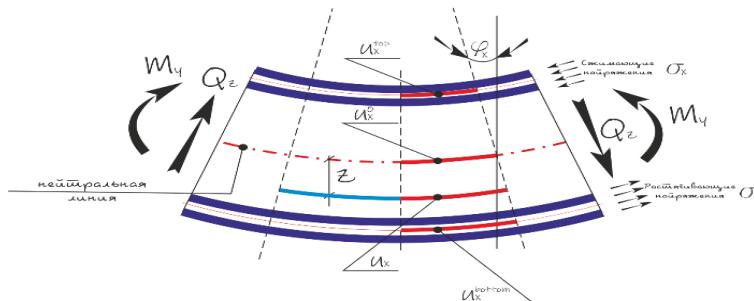


Рис. 3 - Сечение трехслойной пластины после деформации
 Fig. 3 - Section of a three-layer plate after deformation

Методы исследования. Разрешающие уравнения будут получены, исходя из вариационного принципа Лагранжа. Полная энергия W состоит из потенциальной энергии U деформации тела (потенциала внутренних сил) за вычетом энергии (потенциала) A_q внешних сил:

$$W = U - A_q. \quad (1)$$

Потенциальная энергия деформации трехслойной пластины с учетом ползучести и работа внешних сил определяется следующим образом:

$$\underbrace{U}_{\substack{\text{Изгиб металлической} \\ \text{оболочки}}} + \underbrace{U}_{\substack{\text{Изгиб заполнителя}}} + \underbrace{U}_{\substack{\text{Сдвиг заполнителя} \\ \text{с учетом ползучести}}} = \frac{1}{2} \int_V \sigma_{x,m}^{el} \cdot \varepsilon_{x,m}^{el} dV + \frac{1}{2} \int_V \sigma_{x,poly}^{el} \cdot \varepsilon_{x,poly}^{el} dV + \frac{1}{2} \int_V \tau_{mid}^{el} \cdot \gamma_{mid}^{el} dV; \quad (2)$$

Работа внешних сил:

$$A_q = \int_0^l q w dx. \quad (3)$$

Здесь: $\varepsilon_{x,m}^{el}$, $\sigma_{x,m}^{el}$ — относительная деформация и нормальное напряжение несущих слоев; $\varepsilon_{x,poly}^{el}$, $\sigma_{x,poly}^{el}$ — относительная деформация и нормальное напряжение среднего полимерного слоя; γ_{mid}^{el} , τ_{mid}^{el} — относительная угловая деформация и касательное напряжение среднего полимерного слоя.

Рассмотрим поэлементно, в случае постоянного сечения $dV = dx \cdot dA = dx \cdot b \cdot h$ (рис. 4):

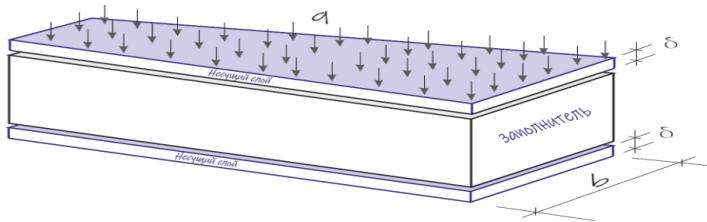


Рис. 4 - Сечение трехслойной пластины после деформации
 Fig. 4 - Section of a three-layer plate after deformation

Первое слагаемое соотношения (2) *:

$$\begin{aligned}
 & 2 \cdot \left(\frac{1}{2} \int_V \sigma_{x,m}^{el} \cdot \varepsilon_{x,m}^{el} dV \right); \quad \sigma_{x,m}^{el} = \frac{M_y(x)}{I_{y,m}} z; \quad \varepsilon_{x,m}^{el} = \frac{\sigma_{x,m}^{el}}{E}. \\
 & 2 \cdot \left(\frac{1}{2} \int_V \sigma_{x,m}^{el} \cdot \varepsilon_{x,m}^{el} dV \right) = 2 \frac{1}{2} \int_V \frac{(\sigma_{x,m}^{el})^2}{E} dV = 2 \cdot \frac{1}{2} \int_0^l \frac{(M_y(x))^2}{E_m I_{y,m}} z^2 dx dA = \\
 & = 2 \cdot \frac{1}{2} \int_0^l \frac{(M_y(x))^2}{E_m I_{y,m}} \underbrace{\left(\int_A z^2 dA \right)}_{I_{y,m}} dx = 2 \cdot \left(\frac{1}{2} \int_0^l \frac{(M_y(x))^2}{E_m I_{y,m}} dx \right); \\
 & \left(EI_{y,m} \frac{d^2 w}{dx^2} \right)^2 = (M_y(x))^2 \rightarrow \text{тогда окончательно} \\
 & 2 \cdot \left(\frac{1}{2} \int_V \sigma_{x,m}^{el} \cdot \varepsilon_{x,m}^{el} dV \right) = EI_{y,m} \int_0^l \left(\frac{d^2 w}{dx^2} \right)^2 dx; \tag{4}
 \end{aligned}$$

Второе слагаемое соотношения (2):

$$\begin{aligned}
 & \left(\frac{1}{2} \int_V \sigma_{x,poly}^{el} \cdot \varepsilon_{x,poly}^{el} dV \right) = E_{poly} I_{y,poly} \int_0^l \left(\frac{d^2 w}{dx^2} \right)^2 dx = \frac{G_{poly} k}{2} \frac{2(1+\nu)}{12} b h^3 \int_0^l \left(\frac{d^2 w}{dx^2} \right)^2 dx; \\
 & \left(\frac{1}{2} \int_V \sigma_{x,poly}^{el} \cdot \varepsilon_{x,poly}^{el} dV \right) = k \int_0^l \left(\frac{d^2 w}{dx^2} \right)^2 dx; \tag{5}
 \end{aligned}$$

Третье слагаемое соотношения (2):

$$\begin{aligned}
 & \frac{1}{2} \int_V \tau_{poly}^{el} \cdot \gamma_{poly}^{el} dV; \quad \tau_{poly}^{el} = G_{poly} \cdot \gamma_{poly}^{el}; \quad \gamma_{poly}^{el} = \gamma_{poly} - \gamma_{poly}^{cr} \\
 & = \left(\frac{\partial u_x(z)}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) - \gamma_{poly}^{cr}; \\
 & \frac{1}{2} \int_V G_{poly} \cdot (\gamma_{poly}^{el})^2 dV = \frac{G_{poly}}{2} \int_0^l \left(\frac{\partial u_x(z)}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} - \gamma_{poly}^{cr} \right)^2 dx \cdot b \cdot h = \\
 & = \frac{1}{2} \int_0^l G_{poly} b h \left(\frac{\partial u_x(z)}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} - \gamma_{poly}^{cr} \right)^2 \tag{6}
 \end{aligned}$$

Подставим (3), (4), (5) и (6) в (2) и перейдём к разностной схеме:

$$U = \left(\frac{E_m I_{y,m}}{2} + k \right) \int_0^l \left(\frac{d^2 w}{dx^2} \right)^2 dx + \frac{1}{2} G_{poly} b h \int_0^l \left(\frac{\partial u_x(z)}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} - \gamma_{mid}^{cr} \right)^2 - \int_0^l q w dx; \tag{7}$$

Схема для перехода к разностной аппроксимации функционала представлена на рис.5.

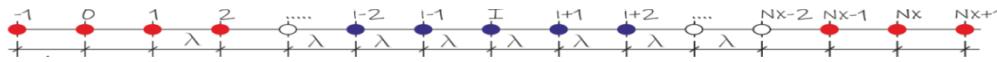


Рис. 5 - Сетка средней линии трехслойной балки
 Fig. 5 - The centerline mesh of a three-layer beam

Для точки « i »

$$\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = \frac{w_{i-1} - 2w_i + w_{i+1}}{\lambda^2}; \quad \frac{\partial w}{\partial x} = \frac{w_{i+1} - w_{i-1}}{2\lambda};$$

$$U = \left(\frac{1}{2}E_m I_{y,m} + k\right) \sum_{i=1}^n \left[\frac{w_{i-1} - 2w_i + w_{i+1}}{\lambda^2} \right]^2 \cdot \lambda + \frac{G_{poly}bh}{2} \sum_{i=1}^n \left[\frac{w_{i+1} - w_{i-1}}{2\lambda} + \frac{\partial u_i}{\partial z} - \gamma_{poly}^{cr} \right]^2 \cdot \lambda$$

$$- \sum_{i=1}^n q_i \cdot w_i \cdot \lambda;$$

Перепишем в развернутом виде:

$$U = \left(\frac{1}{2}E_m I_{y,m} + k\right) \left[\dots + \left(\frac{w_{i-2} - 2w_{i-1} + w_i}{\lambda^2} \right)_{i-1}^2 + \left(\frac{w_{i-1} - 2w_i + w_{i+1}}{\lambda^2} \right)_i^2 \right.$$

$$+ \left. \left(\frac{w_i - 2w_{i+1} + w_{i+2}}{\lambda^2} \right)_{i+1}^2 \dots \right] +$$

$$+ \frac{G_{poly}bh\lambda}{2} \left[\dots + \left(\frac{w_i - w_{i-2}}{2\lambda} + \frac{\partial u_{i-1}}{\partial z} - \gamma_{i-1}^{cr} \right)_{i-1}^2 + \left(\frac{w_{i+1} - w_{i-1}}{2\lambda} + \frac{\partial u_i}{\partial z} - \gamma_i^{cr} \right)_i^2 \right.$$

$$+ \left. \dots \right] + \left(\frac{w_{i+2} - w_i}{2\lambda} + \frac{\partial u_{i+1}}{\partial z} - \gamma_{i+1}^{cr} \right)_{i+1}^2 + q_i \lambda (\dots + w_{i-1} + w_i + \dots);$$

Здесь нижний индекс у круглых скобок указывает, к каким узлам относятся производные, т. е. какие это части потенциальной энергии. Условие минимума полной потенциальной энергии по w_i :

$$\frac{\partial U}{\partial w_i} = \left(\frac{1}{2}E_m I_{y,m} + k\right) \left[2 \left(\frac{w_{i-2} - 2w_{i-1} + w_i}{\lambda^2} \right) \frac{1}{\lambda^2} + 2 \left(\frac{w_{i-1} - 2w_i + w_{i+1}}{\lambda^2} \right) \left(-\frac{2}{\lambda^2} \right) \right.$$

$$+ 2 \left(\frac{w_i - 2w_{i+1} + w_{i+2}}{\lambda^2} \right) \frac{1}{\lambda^2}$$

$$+ \frac{G_{poly}bh}{2} \lambda \left[2 \left(\frac{w_i - w_{i-2}}{2\lambda} + \frac{\partial u_{i-1}}{\partial z} - \gamma_{i-1}^{cr} \right) \frac{1}{2\lambda} + 0 \right.$$

$$+ \left. 2 \left(\frac{w_{i+2} - w_i}{2\lambda} + \frac{\partial u_{i+1}}{\partial z} - \gamma_{i+1}^{cr} \right) \left(-\frac{1}{2\lambda} \right) \right] + q_i \lambda = 0; \quad \left| \frac{1}{\lambda} \right.$$

$$\frac{\partial U}{\partial w_i} = \left(\frac{1}{2}E_m I_{y,m} + k\right) \cdot 2 \cdot \left[\frac{w_{i-2} - 4w_{i-1} + 6w_i - 4w_{i+1} + w_{i+2}}{\lambda^4} \right] +$$

$$G_{mid}bh \frac{2}{2} \left[-\frac{w_{i-2} - 2w_i + w_{i+2}}{4\lambda^2} - \frac{\frac{\partial u_{i-1}}{\partial z} - \frac{\partial u_{i+1}}{\partial z}}{2\lambda} + \frac{\gamma_{i+1}^{cr} - \gamma_{i-1}^{cr}}{\frac{\partial \gamma_i^{cr}}{\partial x}} \right] - q_i = 0$$

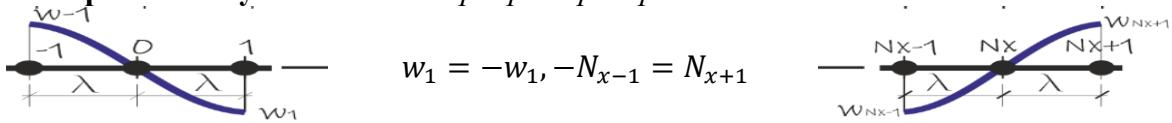
Введём замену $E_m I_{y,m} + 2k = \xi$. Окончательно:

$$w_{i-2} \left[\frac{\xi}{\lambda^4} - \frac{G_{poly}bh}{4\lambda^2} \right] + w_{i-1} \left(-\frac{4\xi}{\lambda^4} \right) + w_i \left[6 \frac{\xi}{\lambda^4} + \frac{2G_{poly}bh}{4\lambda^2} \right] +$$

$$+ w_{i+1} \left[-4 \frac{\xi}{\lambda^4} \right] + w_{i+2} \left[\frac{\xi}{\lambda^4} - \frac{G_{poly}bh}{4\lambda^4} \right] = \underbrace{G_{poly}bh \frac{M_y}{E_m I}}_F + q_i - G_{poly}bh \frac{\partial \gamma_i^{cr}}{\partial x}, \quad (8)$$

где $E_m I_{y,m} = E_m \cdot b \cdot \delta^3 / 12$ - собственная жесткость обшивки, работающей по балочной схеме; $E_m I = E_m \cdot b \cdot \delta \cdot h^2 / 2$ - жесткость обшивки относительно общего центра тяжести сечения; k - переменная, связанная со сдвиговой жесткостью заполнителя, определяемая согласно (5).

Границные условия. Шарнирное раскрепление



Запишем для $i = 1$

$$-w_{-1} \left[\frac{\xi}{\lambda^4} - \frac{G_{poly}bh}{4\lambda^2} \right] + w_0 \left(-\frac{4\xi}{\lambda^4} \right) + w_1 \left[6 \frac{\xi}{\lambda^4} + \frac{2G_{poly}bh}{4\lambda^2} \right] + \\ + w_2 \left[-4 \frac{\xi}{\lambda^4} \right] + w_3 \left[\frac{\xi}{\lambda^4} - \frac{G_{poly}bh}{4\lambda^4} \right] = F.$$

Приведем коэффициенты при w_1 :

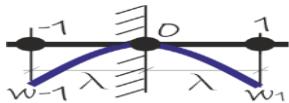
$$- \left[\frac{\xi}{\lambda^4} - \frac{G_{poly}bh}{4\lambda^2} \right] + \left[6 \frac{\xi}{\lambda^4} + \frac{2G_{poly}bh}{4\lambda^2} \right] = \left[5 \frac{\xi}{\lambda^4} + \frac{3G_{poly}bh}{4\lambda^2} \right].$$

Окончательно:

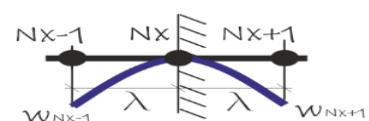
$$w_0 \left(-\frac{4\xi}{\lambda^4} \right) + w_1 \left[5 \frac{\xi}{\lambda^4} + \frac{3G_{poly}bh}{4\lambda^2} \right] + w_2 \left[-4 \frac{\xi}{\lambda^4} \right] + w_3 \left[\frac{\xi}{\lambda^4} - \frac{G_{poly}bh}{4\lambda^4} \right] = F.$$

Аналогично записывается и для N_{x-1}

Жесткая заделка



$$w_1 = w_1, N_{x-1} = N_{x+1}$$



Запишем для N_{x-1}

$$w_{-1} \left[\frac{\xi}{\lambda^4} - \frac{G_{poly}bh}{4\lambda^2} \right] + w_0 \left(-\frac{4\xi}{\lambda^4} \right) + w_1 \left[6 \frac{\xi}{\lambda^4} + \frac{2G_{poly}bh}{4\lambda^2} \right] + \\ + w_2 \left[-4 \frac{\xi}{\lambda^4} \right] + w_3 \left[\frac{\xi}{\lambda^4} - \frac{G_{poly}bh}{4\lambda^4} \right] = F.$$

Окончательно:

$$w_0 \left(-\frac{4\xi}{\lambda^4} \right) + w_1 \left[7 \frac{\xi}{\lambda^4} + \frac{G_{poly}bh}{4\lambda^2} \right] + w_2 \left[-4 \frac{\xi}{\lambda^4} \right] + w_3 \left[\frac{\xi}{\lambda^4} - \frac{G_{poly}bh}{4\lambda^4} \right] = F.$$

Изгибающий момент и поперечная сила для рассматриваемой балки определяются следующим образом:

$$Q(x) = \frac{ql}{2} - qx; \quad M_y(x) = \frac{qx}{2}(l-x). \quad (9)$$

Уравнение (8) решается численно методом конечных разностей [14-15]. Если закон ползучести задан в дифференциальной форме, то зная деформацию ползучести и напряжение в текущий момент времени, можно определить скорость роста деформации ползучести и ее величину в момент времени $t + \Delta t$:

$$\gamma_i^{cr}(t + \Delta t) = \gamma_i^{cr}(t) + \frac{\partial \gamma_i^{cr}}{\partial t} \Delta t.$$

В уравнении (8) нагрузка q считается положительной, если она направлена вверх. В рассматриваемом случае нагрузка направлена вниз, поэтому перед первым слагаемым в скобках (8) знак “-”. В качестве уравнения состояния принят закон Максвелла-Томсона:

$$\frac{\partial \gamma_{mid}^{cr}}{\partial t} = \frac{1}{nG_{poly}} \underbrace{\left[\left(1 - \frac{H}{G_{poly}} \right) \tau - H \gamma_{mid}^{cr} \right]}_K$$

где n – время релаксации, $K = n \cdot G_{poly}$

Обсуждение результатов. Расчет был выполнен в программном комплексе MATLAB. Из приведенной зависимости (рис. 3) видно, что деформации резко возрастают в период времени от 0 до 80 суток, а затем приходят к конечному значению. Авторами рассмотрена задача при следующих данных: $q = 0,6 \frac{\text{kH}}{\text{м}}$; $l = 1,5 \text{ м}$; $\delta = 0,001 \text{ м}$; $h = 0,06 \text{ м}$; $b = 0,1 \text{ м}$; $E_m = 0,71 \cdot 10^8 \frac{\text{kH}}{\text{м}^2}$; $G_{poly} = 4,85 \cdot 10^3 \frac{\text{kH}}{\text{м}^2}$; $H = 3,17 \cdot 10^3 \frac{\text{kH}}{\text{м}^2}$; $n = 230,62 \text{ ч}$.

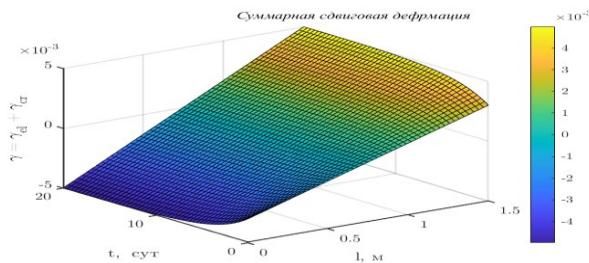


Рис. 6 - График изменения суммарной сдвиговой деформации во времени. Схема «шарнир-шарнир»
 Fig. 6 - Graph of change in total shear deformation over time. Hinge-hinge scheme

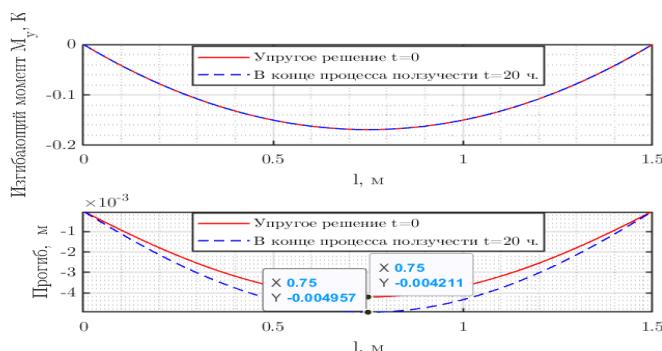


Рис. 7 - График изменения изгибающего момента и прогиба по длине балки: 1 – распределение изгибающего момента по длине балки в начале и конце процесса ползучести; 2 – распределение прогиба по длине балки в начале и в конце процесса ползучести. Схема «Шарнир-Шарнир»
 Fig. 7 - Graph of the change in bending moment and deflection along the length of the beam: 1 – distribution of bending moment along the beam length at the beginning and end of the creep process; 2 – distribution of deflection along the beam length at the beginning and end of the creep process. Scheme “Hinge-Hinge”

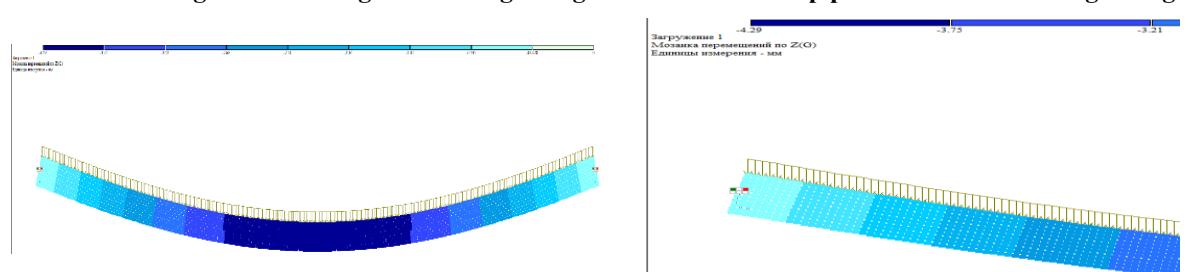


Рис. 8 - Распределение прогиба по длине балки и фрагмент мозаики в начале процесса ползучести.
 Схема «Шарнир-Шарнир». Расчет ПК ЛИРА САПР (Упругое решение)
 Fig. 8 - Distribution of deflection along the beam length and a fragment of the mosaic at the beginning of the creep process. Scheme “Hinge-Hinge”. Calculation by PC LIRA SAPR (Elastic solution)

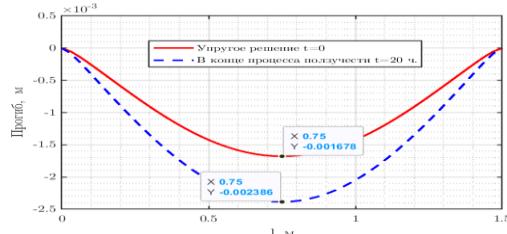


Рис. 9 - Распределение прогиба по длине балки в начале и в конце процесса ползучести.
 Схема «Зашемление-Зашемление»
 Fig. 9 - Distribution of deflection along the beam length at the beginning and end of the creep process.
 "Clamping - Clamping" scheme

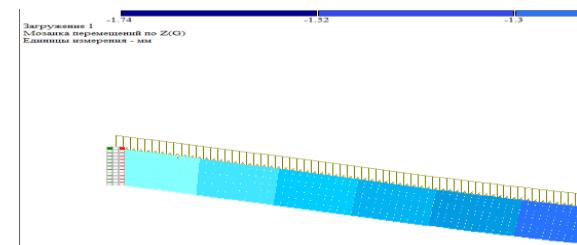


Рис. 10 - Распределение прогиба по длине балки и фрагмент мозаики в начале процесса ползучести.
 Схема «Зашемление-Зашемление».
 Расчет ПК ЛИРА САПР (Упругое решение)
 Fig. 10 - Distribution of deflection along the beam length and a fragment of the mosaic at the beginning of the creep process. Scheme – “Pinch-Pinch”. Calculation of PC LIRA SAPR (Elastic solution)

Вывод. Использование вариационно-разностного метода позволяет получить уточнённое решение, содержащее компоненты работы листов обшивки по балочной схеме, а также работу самого заполнителя на изгиб, что отсутствует в подходе, ориентированное на прямое использование метода конечных разностей [16]. Необходимо отметить, что в случае значительного отличия в значения модуля упругости металлической обшивки и полимерного заполнителя, приведённое уточнение весьма незначительно. Так, в схеме «шарнир-шарнир» учёт работы обшивки по балочной схеме и работы заполнителя на изгиб, снижают максимальные значения деформации с 4.226 мм до 4.211 мм.

Получение разрешающих дифференциальных уравнений 4 порядка позволяет использовать произвольные граничные условия, в том числе «зашемление-зашемление».

Для оценки достоверности полученных результатов в упругой постановке выполнено сравнение решения с программным комплексом Лира САПР. Расхождение в случае постановки граничных условий «шарнир-шарнир», полученного при решении в ПК Лира, с авторским решением, не превышает 0,4 %; в случае граничных условий «зашемление-зашемление» — расхождение не превышает 3,7 %. Разница объясняется тем, что моделирование в ПК Лира САПР было выполнено при помощи четырехугольных конечных элементов (балка «разбита» на 250 КЭ по длине и 10 КЭ по высоте), металлическая обшивка была представлена стержневыми конечными элементами.

Библиографический список:

1. Seydel E. Shear buckling of corrugated plates. *Jahrbuch die Deutschen Versuchsanstalt fur Luftfahrt*. 1931;9: 233–245.
2. Zheng Ye., Berdichevsky V.L., Wenbin Yu. An equivalent classical plate model of corrugated structures. *International Journal of Solids and Structures*. 2014;51: 2073–2083
3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2013/1496. Лукин А.О. Определение прогибов балок с гофрированной стенкой с учетом сдвиговых деформаций//Инженерный вестник Дона, 2013, № 1
4. Турусов Р.А., Маневич Л.И. Метод контактного слоя в адгезионной механике. одномерные задачи. Сдвиг соединения внахлестку//Клеи, герметики. технологии.2009. № 6. С. 2-12.
5. Turusov R.A., Kuperman A., Andreev V.I. Determining the true strength of the material of fiberglass thick rings when stretched with half-disks. *Advanced materials research*.2015;1(102):155-159.
6. Языев Б.М., Андреев В.И., Турусов Р.А. Некоторые задачи и методы механики макронеоднородной упругой среды. ростов-н/д: РГСУ, 2009.
7. Болотин В.В., Новичков Ю.Н. Механика многослойных конструкций. М.:Машиностроение, 1980. 375 с.
8. Рабинович А.Л. Введение в механику армированных полимеров. м.: Наука,1970. 482 с.
9. Ржаницын А.Р. Теория ползучести. – М.: Стройиздат, 1968. – 416 с
10. Лапина, А.П. Совершенствование энергетического метода в расчетах балок на устойчивость плоской формы изгиба [Текст] / А.П. Лапина, А.С. Чепурненко, И.М. Зотов, Б.М. Языев // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2019. – № 4 (77). – С. 5-16.
11. Лукаш П.А. Основы нелинейной строительной механики. – М.: Стройиздат, 1978. – 208 с.
12. Юсупов А.К., Муселемов Х.М., Вишталов Р.И. Оптимизация параметров конструкций путем применения сталей различной прочности // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2024;51(2):232-240.
13. Масленников А.М. Расчет строительных конструкций численными методами: Учеб. пособие. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1987. – 224 с.
14. Метод конечных элементов в механике твердых тел/ А.С. Сахаров, В.Н. Кислоокий, В.В. Киричевский и др.; Под общ. ред. А.С. Сахарова и И. Альтенбаха. – Киев: Вища шк., 1982. – 480 с. .
15. Ma H.M., Gao X.-L., Reddy J.N. A microstructure-dependent Timoshenko beam model based on a modified couple stress theory. *Journal of the mechanics and physics of solids*. 2008;56(12):3379-3391.
16. Чепурненко А.С., Чепурненко В.С., Савченко А.А. Расчет трехслойной балки с учетом ползучести среднего слоя // Молодой исследователь Дону. 2017. № 4(7). С. 102-106.

References:

1. Seydel E. Shear buckling of corrugated plates. *Jahrbuch die Deutschen Versuchsanstalt fur Luftfahrt*. 1931;9: 233–245.

2. Zheng Ye., Berdichevsky V.L., Wenbin Yu. An equivalent classical plate model of corrugated structures. *International Journal of Solids and Structures*. 2014;51: 2073–2083
3. URL:ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2013/1496. Lukin A.O. Determination of deflections of beams with a corrugated wall taking into account shear deformations. *Engineering Bulletin of the Don*, 2013;1. (In Russ)
4. Turusov R.A., Manevich L.I. Contact layer method in adhesive mechanics. One-dimensional problems. Shear of overlap joint. *Adhesives. sealants. technologies*. 2009; 6: 2-12. (In Russ)
5. Turusov R.A., Kuperman A., Andreev V.I. Determining the true strength of the material of fiberglass thick rings when stretched with half-disks. *Advanced materials research*.2015;1(102):155-159.
6. Yazyev B.M., Andreev V.I., Turusov R.A. Some problems and methods of mechanics of macroinhomogeneous elastic medium. Rostov-n/d: RSSU, 2009. (In Russ)
7. Bolotin V.V., Novichkov Yu.N. Mechanics of multilayer structures. M.: Mashinostroenie, 1980:375 (In Russ)
8. Rabinovich A.L. Introduction to the Mechanics of Reinforced Polymers. M.: Nauka, 1970: 482. (In Russ)
9. Rzhanitsyn A.R. Creep Theory. - M.: Stroyizdat, 1968: 416. (In Russ)
10. Lapina, A.P. Improving the Energy Method in Calculating Beams for Stability of Plane Bending [Text] / A.P. Lapina, A.S. Chepurnenko, I.M. Zotov, B.M. Yazyev. *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture*. 2019; 4 (77): 5-16. (In Russ)
11. Lukash P.A. Fundamentals of Nonlinear Structural Mechanics. Moscow: Stroyizdat, 1978;208.
12. Yusupov A.K., Muselemov H.M., Vishtalov R.I. Optimization of Structural Parameters by Using Steels of Different Strengths. *Herald of the Dagestan State Technical University. Technical sciences*. 2024; 51(2):232-240. (In Russ)
13. Maslenikov A.M. Calculation of Building Structures by Numerical Methods: Textbook. manual. – Leningrad: Publishing House of Leningrad University, 1987:224. (In Russ)
14. Finite Element Method in Solid Mechanics. A.S. Sakharov, V.N. Kisloko, V.V. Kirichevsky et al.; Under the general editorship of A.S. Sakharov and I. Altenbach. Kyiv: Vishcha shk. 1982:480. (In Russ)
15. Ma H.M., Gao X.-L., Reddy J.N. A microstructure-dependent Timoshenko beam model based on a modified couple stress theory. *Journal of the mechanics and physics of solids*. 2008;56(12):3379-3391.
16. Chepurnenko A.S., Chepurnenko V.S., Savchenko A.A. Calculation of a three-layer beam taking into account the creep of the middle layer. *Young researcher Don*. 2017; 4(7):102-106. (In Russ)

Сведения об авторах:

Языев Батыр Меретович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры строительной механики и теории сооружений; ps62@yandex.ru; ORCID 0000-0002-5205-1446

Литвинов Степан Викторович, доцент, доцент кафедры строительной механики и теории сооружений; litvstep@yandex.ru; ORCID 0000-0001-5729-1425;

Виноградова Елена Владимировна, кандидат технических наук доцент, доцент кафедры технологии строительства и конструкционных материалов; alenkavv@yandex.ru;

Магомедов Марсель Айдемирович, аспирант кафедры строительной механики; marsmag05@ya.ru. ORCID 0000-0001-5517-919X

Information about authors:

Batyr M. Yazyev, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Prof., Department of Structural Mechanics and Theory of Structures; ps62@yandex.ru; ORCID 0000-0002-5205-1446

Stepan V. Litvinov, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Assoc. Prof., Department of Structural Mechanics and Theory of Structures; ps62@yandex.ru ; ORCID 0000-0001-5729-1425,

Elena V. Vinogradova, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Assoc. Prof., Department of Construction Technology and Structural Materials; alenkavv@yandex.ru,

Marcel A. Magomedov, Postgraduatet, Department of Structural Mechanics; marsmag05@ya.ru; ORCID 0000-0001-5517-919X;

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 29.10.2024.

Одобрена после рецензирования/Revised 30.11.2024.

Принята в печать/Accepted for publication 16.01.2025.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

Верстка журнала осуществляется с электронных копий. Используется компьютерная обработка шрифтовых и полутоновых (в градациях серого) рисунков. Журнал изготавливается по технологии офсетной печати. В редакции журнала необходимо представить: распечатку рукописи (1 экз.); распечатка должна представлять собой письменную копию файла статьи; электронную копию (допускается передача по электронной почте); метаданные авторов: ФИО, место работы, учченое 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 встроенным редакторе формул MicrosoftWord или в редакторе MathType. Шрифтовое начертание обозначений в формулах, в таблицах и в основном тексте должно быть полностью идентичными. Ссылки на формулы и таблицы даются в круглых скобках, ссылки на использованные источники (литературу) - в квадратных скобках. Формат бумаги А4. Параметры страницы: поля - левое 3 см, верхнее и нижнее 2 см, правое 1,5 см; колонтитулы отсутствуют.

Элементы заглавия публикуемого материала

УДК: Перечень авторов (разделяется запятыми, инициалы после фамилий, на русском и английском языке); выравнивание по центру. Название статьи (на русском и английском языке). Резюме (Abstract) – 200-250 слов, характеризующих содержание статьи (на русском и английском языке). Ключевые слова (keywords) 5-10 слов или словосочетаний, отражающих содержание статьи (на русском и английском языке). Каждый элемент заглавия приводится, начиная с новой строки; выравнивание проводится по центру. **Основной текст** Шрифт TimesNewRoman 12 pt, выравнивание по ширине, первая строка с отступом 1,25 см, межстрочный интервал - 1.

Библиографический список

В статье указывается строка с текстом «**Библиографический список**». Библиографический список на русском языке выполняется по ГОСТ Р 7.0.5-2008. Библиографический список должен составлять не менее 15 наименований источников литературы, среди которых от 30-70% ссылок на иностранные источники. Ссылки на неопубликованные работы не допускаются. Обязательное цитирование современных работ, изданных на тематике статьи за последние 5 лет. Для 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), учченое звание, ORCID, название и полный адрес места работы. Обязательно указывается адрес электронной почты. Сведения представляются на русском и английском языках.

Верстка формул, рисунков, таблиц

Формулы подготавливаются во встроенным 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 отдельной строку формулы выравниваются по середине строки, номер заключается в круглые скобки и выравнивается по правому краю текста. Все впервые встречающиеся в формуле обозначения должны быть расшифрованы сразу после формулы. Рисунки, представляющие собой графики, схемы и т. п., должны быть выполнены в графических векторных редакторах (встроенный редактор MicrosoftWord, CorelDraw, MicrosoftVisio и т. п.). Использование точечных форматов (.bmp, .jpeg, .tif, .html) допустимо только для рисунков, представление которых в векторных форматах невозможно (фотографии, копии экрана монитора и т. п.). Название рисунка указывается на русском и английском языках. Таблица состоит из следующих элементов: нумерационного заголовка (слова «Таблица» и ее номера арабскими цифрами); шапки (заголовочной части), включающей заголовки граф (объясняют значение данных в графах); боковика (первой слева графы) и прографки. Название таблицы указывается на русском и английском языках.

Требования к рецензированию и хранению рецензий научных статей, поступивших в редакцию журнала

Научная статья, поступившая в редакцию журнала, рассматривается ответственным редактором на соответствие тематике и направлениям журнала, правилам оформления и наличие сопроводительных документов. Редакция осуществляет рецензирование всех поступающих в редакцию материалов, с целью их экспертной оценки. Все рецензенты являются признанными специалистами по тематике рецензируемых материалов. Рецензии хранятся в редакции издания в течение 5 лет. При поступлении соответствующего запроса редакция вправе направлять копии рецензий в Министерство науки и высшего образования РФ.

План-график издания журнала

Выпуск 1 (март) – прием статей до 31 декабря предыдущего года; Выпуск 2 (июнь) – прием статей до 31 марта текущего года; Выпуск 3 (сентябрь) – прием статей до 30 июня текущего года; Выпуск 4 (декабрь) – прием статей до 30 сентября текущего года. Редколлегия оставляет за собой право производить редакционные изменения, не искажающие основное содержание статьи. Статьи, не отвечающие правилам оформления, к рассмотрению не принимаются. Рукописи и электронные носители авторам не возвращаются. Датой поступления считается день получения редколлегии окончательного текста статьи. Адрес редакционного совета: 367015, РД, г. Махачкала, пр. И. Шамиля, 70, ФГБОУ ВО «ДГТУ», Учебно-лекционный корпус 2, редакция журнала «Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки». Технические вопросы можно выяснить по электронному адресу: aidaesetova@rambler.ru и по телефону 8(8722)62-39-64, +79280504268

FORMATTING REQUIREMENTS FOR PAPERS

Electronic copies are used when laying out the journal. Computer processing is used for line and halftone (grayscale) graphics. The journal is produced by offset printing technology. Therefore, the following should be submitted to the editor: a printout of the manuscript (2 copies.); the printout should be a hard copy of the electronic article file; electronic copy (e-mail is acceptable); an expert opinion supporting the article's suitability for publication (1 copy); Information about authors: Name, place of work, academic rank, position.

Guidance for the preparation of texts

The text should be prepared in Microsoft Word. The article must include sections entitled: "Introduction", "Background", "Methods", "Results and Discussion", "Conclusion". The article itself is supposed to comprise at least 9-10 if typewritten pages. Formulas should be prepared in Microsoft Word's built-in equation editor or MathType. Font symbols used in formulae, tables and in the main text must be completely identical. References to formulae and tables are given in round brackets; references to the sources referred to (literature) – in square brackets. Paper size – A4. Page setup: margins – left 3 cm, top and bottom – 2 cm, right – 1.5 cm; no headers or footers. **Elements of the title of the published material** UDC / LBC; List of authors (separated by commas; initials after surnames; in Russian and English); alignment right. Title of the article (in Russian and English). Abstract – 200-250 words or characters describing the content of the article (in Russian and English). Keywords – 5-10 words or phrases that reflect the content of the article (in Russian and English). Each title element should start on a new line; aligned centre. **Body text**. Font TimesNewRoman 12 pt, full justification, first line with 1.25 cm indentation, line spacing – 1.

Bibliography

The bibliography list should be entitled References. References in Russian prepared according to GOST R 7.0.5-2008.

The reference list is considered to include at least 20 names of literature sources, including 30-70% of references to foreign sources. References to unpublished works are not permitted. Only recent works on the subject of the article published within the past 5 years should be cited. The proportion of references to articles previously published by the authors should not exceed 20% of the total number of references. The bibliography must be translated into English. "References" should be drawn up according to the "Vancouver" standard. Please indicate your chosen standard when formulating the bibliography. Links to material on electronic media shall be allowed as a last resort. The editors reserve the right to require a replacement reference from the author if an item is absent at a specified address at the time of processing of the article.

Information about authors

For each author, the following information should be provided: first name, middle name (or patronymic) and last name, scientific or academic degree, academic title, brief academic biography (no more than 5-6 lines), name and full address of place of work. The specification of an email address is mandatory.

Composition of formulas. Layout of figures. Layout of tables

Formulas should be prepared in the built MicrosoftWord equation editor or MathType Editor; only those formulas that are referenced in the text should be numbered; the use of letters or other characters is not permitted when enumerating equations. Formulas written out on a separate line are aligned to the middle of the line; their respective numbers shall be in parentheses and right-aligned. All symbols occurring in the formula for the first time must be decoded immediately after the formula.

Drawings, consisting of graphs, charts, etc. should be prepared in graphic vector editors (the internal editor of MicrosoftWord, CorelDraw, MicrosoftVisio etc.). The use of bitmap formats (.bmp, .jpeg, .tif) is only permissible for graphics whose presentation is not possible in vector formats (photos, screenshots, etc.).

A table should consist of the following elements: numerical title (the word "Table" and its number in Arabic numerals); title (header section) including column headings (explaining the meaning of the data in the columns); side heading (the first column on the left) and the table body (the other columns of the table).

Reviewing requirements for and saving of scientific article reviews, received by the journal editorial staff

A scientific article received by the editorial office is considered by the responsible editor in terms of its compliance with topics and directions of the magazine, formatting guidelines and availability of supporting documents. The editorial staff carries out a review of all incoming materials to the editor with a view to peer review. All reviewers are acknowledged experts on the topic of the peer-reviewed material. Reviews are stored at the editorial office for 5 years. On receipt of a proper request, editorial staff have the right to submit copies of reviews to the RF Ministry of Education and Science.

Publication schedule

Issue 1 (March) – articles accepted until 31 December of the previous year; Issue 2 (June) – articles accepted until March 31 of the present year; Issue 3 (September) – articles accepted until 30 June of the present year; Issue 4 (December) – articles accepted until September 30 of the present year; The Editorial Board reserves the right to make editorial changes which do not distort the main content of the article. Articles that do not conform to formatting guidelines will not be taken into consideration. Manuscripts and electronic media will not be returned. The date of acceptance shall be deemed to be the date of receipt of the final text by the editorial board. Address of the editorial board: 70 Imam Shamil Ave., Makhachkala 367026, Dagestan, Russia. Dagestan State Technical University, Tutorial-Lecture Building 2, Editorial Board «Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences». Technical questions can be clarified by e-mail: aidaesetova@rambler.ru or by telephone 8 (8722) 62-39-64; +79280504268.

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation



ВЕСТНИК
ДАГЕСТАНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА.
ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ
Махачкала, Том 52– № 1 – 2025.

HERALD
OF DAGESTAN STATE TECHNICAL UNIVERSITY.TECHNICAL SCIENCES
Makhachkala, Volume 52, No.1. 2025.

Верстка: Красикова А.В., Попкова И.А.
Перевод: Эсетова А.М.

Адрес редакции:
367015, РД, г. Махачкала, пр. И. Шамиля, 70, ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет»
Тел./факс(8722)623715
(8722)623964
E-mail: vestnik.dgtu@mail.ru Website: <http://vestnik.dgtu.ru>

Layout: Krasikova A.V., Popkova I.A.
Translation: Esetova A.M.

Editorial and Publisher address: 70 I. Shamil Ave., Makhachkala 367015, Daghestan, Russia.

FSBEE HE «DSTU»
Tel./fax (8722)623715
(8722)623964
«БЕСПЛАТНО»

Подписано в печать 01.04.2025г. Сдано в печать 03.04.2025г.
Формат 60x84 1/8. Гарнитура «Times». Бумага офсетная
Тираж 500. Усл. п.л. 29.3 Уч. изд.л. 21.09
Заказ № 3425

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