

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 51, № 4, 2024.

ВЕСТНИК

**ДАГЕСТАНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА.**

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Volume 51, No.4, 2024.

HERALD

**OF DAGHESTAN STATE TECHNICAL UNIVERSITY.
TECHNICAL SCIENCES**

Журнал основан в 1997 году.

Выходит 4 раза в год

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

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

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

© Учредитель и издатель ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет», 2024.

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

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

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

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

© Founder and Publisher Daghestan State Technical University, 2024



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 51, № 4, 2024

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

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

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

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

Редакционная коллегия:

Научная рубрика «Энергетика и электротехника»

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Научная рубрика «Информационные технологии и телекоммуникации»

Ответственный редактор: Мелехин В.Б., д.т.н., профессор ДГТУ, Махачкала, РФ.

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

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

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

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

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

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

Саркаров Т.Э., д.т.н., профессор, зав. кафедрой Дагестанского государственного технического университета, г. Махачкала, РФ.

Финаев В.И., д.т.н., профессор, зав. кафедрой Южного федерального университета, г. Ростов-на-Дону, РФ.

Хачумов В.М., д.т.н., профессор, заведующий лабораторией Института системного анализа РАН, г. Москва, РФ

Шахтарин Б.И., д.т.н., профессор Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, г. Москва, РФ.

Якунин А.Г., д.т.н., профессор, зав. кафедрой Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова, г. Барнаул, РФ.

Научная рубрика «Строительство и архитектура»

Ответственный редактор: Хаджишалапов Г.Н., д.т.н., профессор ДГТУ, Махачкала, РФ.

Андреев В.И., д.т.н., профессор, зав. каф. Национального исследовательского Московского государственного строительного университета, г. Москва, РФ.

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. 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 51, № 4 Махачкала, 2024. 250с.

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

Энергетика и электротехника.....	6
А.В. Бараненко, В.В. Тамаров, М.В. Короленко. Сравнительный анализ водо-ледных аккумуляторов холода.....	6
О.В. Евдулов, М.И. Микаилов, Р.М. Магомедов. Термоэлектрическая система для охлаждения и кондиционирования воздуха в салоне легкового автотранспорта.....	15
Информационные технологии и телекоммуникации.....	23
Абдурахман Джамал Джама. Аналитическая оценка методов обнаружения мошенничества с банковскими картами: обучение с учителем, без учителя и с подкреплением.....	23
Ю.А. Бычковская, В.С. Бычковский. Анализ существующих математических моделей оценивания компетенций студентов высшего образования.....	33
В.А. Воеводин. Об оценивании устойчивости функционирования объектов микропараметрического страхования киберрисков.....	40
В.В. Гарбузов, А.П. Преображенский. Моделирование течения турбулентной жидкости на основе решения уравнения Матъе	50
М.И. Грачев. Модель автоматизации процессов управления вузом.....	60
А.О. Железняков, Р.А. Жилин. Моделирование процессов функционирования организационно-технической системы на основе марковских случайных процессов.....	71
А.В. Калинин, А.Ю. Аликов, Т.А. Юрошева. Разработка программного модуля автоматической коррекции чертежей, полученных в результате обмена графическими данными между САД-системами, на примере мебельного производства.....	80
Н.М. Кодацкий, Е.А. Ревякина, А.Р. Газизов. Системный анализ и обработка информации для задачи выявления поломки информационного накопителя компьютера.....	87
И.И. Лившиц. Показатели безопасности для современных систем электронного документооборота.....	99
Д.И. Лобач. О гипотезе уравнивания состояния технической системы.....	112
П.В. Пересунько. О способах установки координат указателя мыши в случае альтернативных вариантов построения человеко-компьютерного взаимодействия.....	123
С.В. Разумников. Алгоритм для определения степени уязвимости участков облачных вычислений на основе метода ELECTRE I.....	130
Е.В. Савина, К.Я. Раджабов, Т.И. Исабекова. Методические аспекты формирования оценочных материалов при подготовке IT-специалистов в области программирования.....	144
А.М. Садыков, Р.Р. Ямалетдинов, Д.И. Сабирова. Российские средства межсетевое экранирования для защищенных систем.....	154
В.О. Шабля, С.А. Коноваленко, Е.О. Орлов. Методы семантического анализа состояния процесса функционирования системы обнаружения, предупреждения и ликвидации последствий компьютерных атак.....	164
Строительство и архитектура.....	171
Д.В. Абрамкина, А.О. Иванова, Д.Ф. Карпов, Х.М. Вафаева, А.С. Воронов. Анализ формирования воздушных потоков в сопловом клапане.....	171
П.Д. Батаева, З.З. Аларханова, Х.М. Батаева, А.Д. Батаев. Тепломассообмен в процессах декарбонизации и карбонизации воздушных и гидравлических известковых вяжущих веществ и ремонтно-реставрационных составов на их основе.....	179
М.А. Магомедов, В.В. Кузнецов, Б.М. Языев, С.В. Литвинов. Моделирование ползучести для замкнутой цилиндрической оболочки при гидростатическом давлении.....	191
С-А.Ю. Муртазаев, М.Ш. Саламанова. Комплексное модифицирование бетонных композитов.....	201
Г.М. Муртазалиев, М.М. Пайзулаев. Математическое моделирование процесса нелинейного деформирования тонкостенных конструкций.....	209
Г.В. Несветаев, Г.Н. Хаджишалапов, И.А. Животкова. Влияние редиспергируемых полимерных порошков на некоторые свойства строительных растворов с комплексными минеральными добавками.....	217
Л.Н. Панасюк, М.В. Зотов, А.А. Фириченко, М.А. Магомедов. Об одном варианте физических зависимостей при моделировании развития линии отрыва здания от фундамента при выравнивании крена домкратами.....	226
А.К. Юсупов, Х.М. Муселемов, Р.И. Вишталов. Расчетные модели балок с односторонними связями.....	236
Требования к оформлению статей.....	249

Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation
Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education «Daghestan State Technical University»
HERALD OF DAGHESTAN STATE TECHNICAL UNIVERSITY. TECHNICAL SCIENCES. V o l u m e 5 1 , N o . 4 , 2 0 2 4 .

<p>Editor-in-Chief: Rasul M. Aliev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; https://orcid.org/0000-0002-3061-4121</p> <p>Deputy Editor: Aida M. Esetova, Dr. Sci. (Econom.), Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; https://orcid.org/0000-0003-1093-5507</p> <p>Editorial Board: Scientific rubric «Energy and Electrical Engineering»</p> <p>Executive editor: Oleg V. Evdulov, Dr. Sci. (Eng.), Aassoc. Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia;</p> <p>Ganapi J. Akhmedov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia;</p> <p>Alexander P. Ivanov, Dr. Sci. (Mathematics and Physics), Moscow Institute of Physics and Technology (State University), Dolgoprudny, Russia;</p> <p>Nicholay I. Kargin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Vice Rector, Deputy Director of the Institute for Functional Nuclear Electronics, National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia;</p> <p>Dmitry N. Kobzareno, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences Institute of Geothermal Problems, Daghestan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Makhachkala, Russia;</p> <p>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;</p> <p>Magomed Kh. Magomedov, Dr. Sci. (Mathematics and Physics), General Director, "SAUNO" Ltd. Moscow, Russia;</p> <p>Gadzhimet K. Safaraliyev, Dr. Sci. (Mathematics and Physics), Professor, Scientific Director of the «Microelectronics and Nanotechnology» Research Institute, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia;</p> <p>Alexander B. Sulin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Corresponding member, MAX, Institute of Industrial and Marine Medicine of Federal Medical and Biological Agency, St. Petersburg, Russia;</p> <p>Scientific rubric «Information Technology and Telecommunications»</p> <p>Executive editor: Vladimir B. Melekhin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia;</p> <p>Mahir M. Bashirov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Azerbaijan Technical University, Baku, Azerbaijan;</p> <p>Arkady N. Larionov, Dr. Sci. (Economics), Professor, General Director LLC Research Center «Strategy», Moscow, Russia</p> <p>Igor E.Lobanov, Dr. Sci. (Eng.), Leading Researcher, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia;</p> <p>Mher V. Markosyan, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Director of Yerevan Research Institute of Communication Facilities, Yerevan, Republic of Armenia;</p> <p>Aslan G. Mustafayev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia;</p> <p>Eugene A. Rogozin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Voronezh Institute of the Ministry of the Interior of Russia, Voronezh, Russia;</p> <p>Tazhudin E. Sarkarov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia;</p> <p>Boris I. Shakhtarin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia</p> <p>Valery I. Finayev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department, Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia;</p> <p>Vyacheslav M. Khachumov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of laboratory, Institute for Systems Analysis of RAS, Moscow, Russia;</p> <p>Alexey G. Yakunin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department, Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia.</p> <p>Scientific rubric «Building and architecture» Executive editor: Gadzhimurad N.Khadzhishalapov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia;</p> <p>Vladimir I. Andreev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russia;</p> <p>Alexey N. Davidyuk, Dr. Sci. (Eng.), Honored Builder of Russia, Director, Gvozdev NIIZHB, JSC «SIC Construction», Moscow, Russia;</p> <p>Vladimir G. Kazachek, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Senior researcher, Ataev Institute of Dwelling - NIPTIS Director of Mobile diagnostics in construction, Minsk, Republic of Belarus;</p> <p>Khasan N. Mazhiev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Millionshchikov Grozny State Oil Technical University, Grozny, Russia;</p> <p>Gregory V. Nesvetaev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of Construction Technologies Department, Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia;</p> <p>Batyr M. Yazyev, Dr. Sci. (Eng.), Advisor to RAASN, Professor of Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia.</p>	<p>Research areas</p> <p>2.4.8. Machines and devices, processes of refrigeration and cryogenic equipment (Technical Sciences),</p> <p>2.3.1. System analysis, management and information processing (Technical Sciences),</p> <p>2.3.3. Automation and management of technological processes and production (Technical Sciences),</p> <p>2.3.4. Management in organizational systems (Technical Sciences),</p> <p>1.2.2. Mathematical modeling, numerical methods and program complexes (Technical Sciences),</p> <p>2.3.6. Methods and systems for information security, information security (Technical Sciences),</p> <p>2.3.7. Computer modeling and design automation (Technical sciences)</p> <p>2.1.3. Heat supply, ventilation, air conditioning, gas supply and lighting (Technical Sciences),</p> <p>2.1.5. Building materials and products (Technical Sciences),</p> <p>2.1.9. Construction mechanics (Technical Sciences),</p> <p>Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. Vol. 51, No.4</p> <p>Makhachkala, 2024–250p.</p> <p>Published by Decision of the Academic Council Daghestan State Technical University</p> <p>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</p>
<p>Editorial council</p> <p>Chairman of the editorial council:</p> <p>Boris A. Yakimovich, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia.</p> <p>The co-chairs of the editorial council:</p> <p>Konstantin M. Ivanov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Rector, Ustinov Baltic State Technical University «VOENMECH», Saint-Petersburg, Russia;</p> <p>Vladimir M. Kutuzov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, President St. Petersburg Electrotechnical University «LETI», Saint-Petersburg, Russia;</p> <p>Members of the Editorial Board:</p> <p>Mustafa B.-O. Babanly, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Rector, Azerbaijan State University of Oil and Industry, Baku, Azerbaijan;</p> <p>Islam I. Djanzakov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Corresponding member, SRA RK, Academician of MANEB, Atyrau, Republic of Kazakhstan;</p> <p>Sergey I. Timoshin, Dr. Sci. (Mathematics and Physics), Academician of the Belarusian Academy of Engineering, Professor, Rector, Sukhoi Gomel State Technical University, Gomel, Republic of Belarus;</p>	

CONTENTS

Energy and Electrical Engineering	6
A.V. Baranenko, V.V. Tamarov, M.V. Korolenko. Comparative analysis of water-ice cold storage devices.....	6
O.V. Evdulov, M.I. Mikailov, R.M. Magomedov. Thermoelectric system for cooling and air conditioning in passenger cars.	15
Information Technology and Telecommunications	23
Abdourahman Djama. An analytical assessment of credit card fraud detection techniques: Supervised, Unsupervised, and Reinforcement Learning.....	23
J.A. Bychkovskaya, V.S. Bychkovsky. Analysis of existing mathematical models for assessing the competencies of higher education students.....	33
V.A. Voevodin. On assessing the sustainability of functioning of microparametric cyber risk insurance facilities...40	40
V.V. Garbuzov, A.P. Preobrazhensky. Modeling of turbulent fluid flow based on the solution of the Mathieu equation.....	50
M.I. Grachev. The model of automation of university management processes.....	60
A.O. Zheleznyakov, R.A. Zhilin. Modeling of the processes of functioning of an organizational and technical system based on Markov random processes.....	71
A.V. Kalinichenko, A.Yu. Alikov, T.A. Yurosheva. Software module for automatic correction of drawings obtained as a result of graphic data exchange between CAD systems, using the furniture production example.....	80
N.M. Kodatsky, E.A. Revyakina, A.R. Gazizov. System analysis and information processing to solve the problem of detecting breakdowns of computer information storage.....	87
I.I. Livshits. Security indicators for modern electronic document management systems.....	99
D.J. Lobach. On the hypothesis of the equation for technical system state.....	112
P.V. Peresunko. On methods of setting the coordinates of the mouse pointer in the case of alternative options for constructing human-computer interaction.....	123
S.V. Razumnikov. Algorithm for determining the degree of vulnerability of cloud computing areas based on the Electre I method.....	130
E.V. Savina, K.Ya. Radjabov, T.I. Isabekova. Methodological aspects of the formation of evaluation materials in the training of IT specialists in the field of programming.....	144
A.M. Sadykov, R.R. Yamaletdinov, D.I. Sabirova. Russian firewall screening tools for secured systems.....	154
V.O. Shablya, S.A. Konovalenko, E.O. Orlov. Methods for semantic analysis of the state of the process of functioning of a system for detecting, preventing and eliminating the consequences of computer attacks.....	164
Building and Architecture	171
D.V. Abramkina, A.O. Ivanova, D.F. Karpov, Kh.M. Vafaeva, A.S. Voronov. Analysis of air flow formation in a nozzle valve.....	171
P.D. Bataeva, Z.Z. Alarkhanova, Kh.M. Bataeva, A.D. Bataev. On the issue of forming the properties of restoration compositions based on air and hydraulic binders.....	179
M.A. Magomedov, V.V. Kuznetsov, B.M. Yazyev, S.V. Litvinov. Modeling creep for a closed cylindrical shell under hydrostatic pressure.....	191
S-A.Yu. Murtazaev, M.Sh. Salamanova. Complex modification of concrete composites.....	201
G.M. Murtazaliev, M.M. Paizulaev. Mathematical modeling of the process of nonlinear deformation of thin-walled structures.....	209
G.V. Nesvetaev, G.N. Hadzhishalapov, I.A. Zhivotkova. Effect of redispersible polymer powders on some properties of mortars with complex mineral additives.....	217
L.N. Panasyuk, M.V. Zotov, A.A. Firichenko, M.A. Magomedov. On one variant of physical dependencies in modeling the development of the line of separation of a building from the foundation when leveling the tilt with jacks.....	226
A.K. Yusupov, Kh.M. Muselemov, R.I. Vishtalov. Calculation models of beams with one-way connections.....	236
Formatting requirements for papers	249

ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА
ENERGY AND ELECTRICAL ENGINEERING

УДК 621.565.2

DOI: 10.21822/2073-6185-2024-51-4-6-14



Оригинальная статья /Original article

Сравнительный анализ водо-ледных аккумуляторов холода

А.В. Бараненко, В.В. Тамаров, М.В. Короленко

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

Резюме. Цель. Применение аккумуляции холода в системах охлаждения повышает их эффективность, снижает мощность устанавливаемого оборудования, выравнивает нагрузки на электросети и обеспечивает экономический эффект. **Метод.** Исследование основано на методах термодинамического анализа технических характеристик различных модификаций водо-ледных аккумуляторов холода. **Результат.** Проведен анализ технических характеристик льдоаккумуляторов трех типов: с намораживанием воды на теплообменной поверхности (тип 1), с замораживанием воды в емкости (тип 2) и в контейнерах (тип 3). Разработаны рекомендации по их применению и определены перспективные направления научных исследований в этой области. Сопоставлены удельные параметры: объем, холодопроизводительность и металлоемкость. **Вывод.** Аппараты второго и третьего типов имеют ряд преимуществ перед аппаратами первого типа. Они компактнее, имеют меньшую в 1,5–3 раза металлоемкость. Эффективность льдоаккумуляторов всех трех типов по удельной холодопроизводительности примерно одинакова и находится в пределах 0,08–0,3 кВт/кВтч. Интерес представляют аккумуляторы третьего типа. Для их создания необходимо выполнить комплекс аналитических и экспериментальных исследований.

Ключевые слова: вещества с фазовым переходом, водный лед, льдоаккумулятор, аккумулялирующая емкость, холодопроизводительность, удельная металлоемкость

Для цитирования: А.В. Бараненко, В.В. Тамаров, М.В. Короленко. Сравнительный анализ водо-ледных аккумуляторов холода. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2024; 51(4):6-14. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-4-6-14

Comparative analysis of water-ice cold storage devices

A.V. Baranenko, V.V. Tamarov, M.V. Korolenko

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

Abstract. Objective. The use of cold accumulation in cooling systems increases their efficiency, reduces the power of the installed equipment, equalizes the load on the electrical grid and ensures an economic effect. **Method.** The study is based on the methods of thermodynamic analysis of technical characteristics of various modifications of water-ice cold accumulators. **Result.** The analysis of technical characteristics of three types of ice accumulators was carried out: with water freezing on the heat-exchange surface (type 1), with water freezing in a tank (type 2) and in containers (type 3). Recommendations for their use were developed and promising areas of scientific research were determined. Specific parameters were compared: volume, cooling capacity and metal consumption. **Conclusion.** Devices of the second and third types have a number of advantages over devices of the first type: they are more compact, have a metal consumption 1.5–3 times lower. The efficiency of ice accumulators of all types in terms of specific cooling capacity is approximately the same and is within the range of 0.08–0.3 kW/kWh. Accumulators of the third type are of interest. To create them, it is necessary to carry out a set of analytical and experimental studies.

Keywords: phase change materials, water ice, ice thermal energy storage, storage capacity, cooling capacity, specific metal intensity

For citation: A.V. Baranenko, V.V. Tamarov, M.V. Korolenko. Comparative analysis of water-ice cold storage devices. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2024; 51(4):6-14. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-4-6-14

Введение. Аккумулирование холода относится к технологиям, которые обеспечивают повышение эффективности систем холодоснабжения [1]. Наличие накопителей холода позволяет снимать пиковые нагрузки потребителей холода. Это дает возможность устанавливать холодильные машины меньшей мощности, работающие при этом в оптимальных режимах. Применение холодильных систем с аккумуляторами холода также выравнивает нагрузки на электросети и снижает расходы на электроэнергию, поскольку аккумуляторы заряжаются в периоды непиковых нагрузок электросетей и льготных тарифов [2]. Перспективным методом аккумулялирования холода является использование веществ с фазовым переходом (ВФП), называемых также теплоаккумулирующими веществами.

Известно порядка 1800 ВФП, которые могут применяться в накопителях теплоты и холода [3,4]. Для холодильной техники температуры фазовых переходов жидкость - твердое тело - жидкость веществ должны быть отрицательными или близкими к 0 °С. ВФП с последним диапазоном температур приемлемы для систем охлаждения достаточно большого количества различных технологических процессов, а также систем кондиционирования воздуха (СКВ), которые являются крупными потребителями холода с переменными нагрузками [5]. Требования к свойствам теплоаккумулирующих веществ изложены в целом ряде публикаций. Одними из основополагающих их свойств являются химическая стабильность, постоянство температуры фазовых переходов, небольшие разности значений плотности в жидком и твердом состоянии, а также температур плавления и затвердевания. Относительно большие величины удельной теплоты плавления и плотности ВФП обеспечивают меньшие массы и объемы веществ при заданной емкости аккумуляторов. К веществам, представляющим большой интерес для использования в качестве теплоаккумулирующей среды с фазовым переходом, относится вода. Она доступна, химически стабильна, имеет большую величину фазового перехода при температуре 0 °С (333,4 кДж/кг). При замерзании объем водного льда увеличивается на 9 % по отношению к жидкости [6]. Температура теплоносителя на выходе из водо-ледных аккумуляторов холода, как правило, составляет 1–7 °С. Такой потенциал охлаждения широко востребован в пищевой, химической и других отраслях промышленности, а также в СКВ [7].

Система охлаждения с водным льдом в качестве аккумулялирующей среды обеспечивает минимизацию приведенных затрат [8]. По исследованиям авторов [9] использование льдоаккумулятора в системе кондиционирования воздуха (СКВ) привело к снижению потребления электроэнергии на 11,8 % и уменьшению расходов на нее на 32,7 %. Авторами [10] показано сокращение годового энергопотребления СКВ с аккумулялированием холода водным льдом на 4,6 %.

Постановка задачи. Известны три варианта водо-ледных аккумуляторов холода:

1. Лед намораживается из потока воды на теплообменной поверхности, внутри которой кипит хладагент при отрицательной температуре или же циркулирует теплоноситель, рис.1 [11].
2. Вода замерзает во всем объеме емкости вследствие того, что внутри теплообменной поверхности циркулирует теплоноситель с температурой ниже 0 °С или же кипит хладагент, рис. 3 и рис. 4 [12,13].
3. Вода, как теплоаккумулирующее вещество с фазовым переходом, находится в контейнерах, размещаемых в емкости с циркулирующим теплоносителем [14,15].

Цель настоящей работы заключается в выполнении сравнительного анализа технических характеристик различных модификаций водо-ледных аккумуляторов холода;

в разработке на этой основе рекомендаций по их применению, а также в определении перспективных направлений научных исследований в этой области.

Методы исследования. Конструкции водо-ледных аккумуляторов холода и их технические характеристики. Аккумуляторы холода с намораживаемым льдом из потока воды на теплообменной поверхности испарителя являются самым распространенным типом водо-ледных аккумуляторов. В данных устройствах вода, помимо теплоаккумулирующего вещества с фазовым переходом, также является теплоносителем. Это обстоятельство является недостатком таких систем и не позволяет их использовать в целом ряде технологий, в которых применяются отличные от воды теплоносители. Аккумуляторы данного вида достаточно металлоемки, поскольку в них необходимо иметь развитую поверхность испарителя для намораживания льда, толщина которого в силу его высокого термического сопротивления, как правило не превышает 40 мм. При таянии льда (разрядке аккумулятора) теплоноситель (вода) может быть охлажден до 0,5–1 °С. Этот фактор обуславливает широкое применение этих устройств в технологиях отраслей промышленности, где требуется холод с таким потенциалом и в качестве теплоносителя может быть использована вода. Конструкция аккумуляторов холода данного типа представляет собой герметичную теплоизолированную емкость, заполненную циркулирующей водой, с расположенными в ней секциями испарителя, рис. 1 [11].



Рис. 1. Общий вид льдоаккумулятора компании Орелхолодмаш [11]
Fig. 1. General view of Orelkholodmash ice storage device [11]

В процессе работы системы охлаждения при низких на нее тепловых нагрузках на поверхности испарителя намораживается лёд толщиной до 40 мм (производится контроль системой автоматики). С увеличением нагрузки на систему охлаждения происходит таяние льда и охлаждение воды за счет теплоты плавления. Данные процессы периодически повторяются. В аппаратах в большинстве случаев предусматривают систему барботирования сжатого воздуха между трубками со льдом, что вызывает активное перемешивание воды и интенсивный теплообмен между охлаждаемой водой и поверхностью льда.

В Российской Федерации водо-ледные аккумуляторы холода первого типа выпускают более 10 компаний [11,16-22], преимущественно с трубчато-змеевиковыми испарителями. Орелхолодмаш [11] производит 5 моделей рассматриваемых аппаратов аккумуляторной емкостью 370–1387 кВтч (4096–15070 кг льда). Удельная масса выпускаемых аппаратов находится в пределах 5,08–3,12 кг/кВтч. Типоразмерный ряд льдоаккумуляторов компании AIRCOOL [16] включает в себя 5 модификаций с аккумуляторной емкостью (Q) 260–1560 кВтч. Удельная масса аппаратов находится в пределах 3,08–3,01 кг/кВтч. Под названным параметром подразумевается масса агрегата на единицу запасаемого холода. Общий вид трубчато-змеевикового испарителя этой компании представлен на рис. 2.



Рис. 2. Общий вид трубчато-змеевикового испарителя льдоаккумулятора компании AIRCOOL [16]

Fig. 2. General view of AIRCOOL's tube and coil ice storage evaporator [16]

Промышленные холодильные системы [18] предлагают льдоаккумуляторы аккумуляторной емкостью от 164 до 1050 кВтч с массой намораживаемого льда 1775–11360 кг. В каталоге фирмы представлены 20 модификаций накопителей. Компания «ТехноФрост» [19]

производит 6 модификаций льдоаккумуляторов с аккумулирующей емкостью в диапазоне 191–1260 кВтч (2050–13500 кг льда). Холодопроизводительность накопителей холода (Q_0) находится в диапазоне (17–50)÷(100–300) кВт. В каталоге ООО «Термосистемы» [20] представлены 6 модификаций льдоаккумуляторов емкостью 283–1698 кВтч (3000–18000 кг льда). Также данная фирма выпускает 13 моделей льдоаккумуляторов в составе установок охлаждения молока емкостью 15,5–948 кВтч (168–10266 кг льда). В каталоге предприятия «Арктика» [21] 26 модификаций льдоаккумуляторов. Технические характеристики не приведены. Типоразмерный ряд льдоаккумуляторов компании «Генераторы ледяной воды» [22] включает в себя 18 моделей аппаратов емкостью 15–2067 кВтч. Компания [22] также выпускает комплексные генераторы ледяной воды, укомплектованные холодильными машинами и другим оборудованием. В их состав входят льдоаккумуляторы с петельчатыми испарителями, 25 модификаций аккумулирующей емкостью 16,2–7614 кВтч; с панельными испарителями, 24 модификации емкостью 16,2–3366 кВтч. Компания также предлагает генераторы ледяной воды, оснащенные льдоаккумуляторами с петельчатыми теплообменниками с циркулирующим в них теплоносителем - водным раствором пропиленгликоля, 29 модификаций емкостью 16,2–12276 кВтч. К первому типу таких устройств относятся коаксиальные льдоаккумуляторы [23,24]. Рассматриваемые аппараты выпускаются также зарубежными производителями [25-27].

На рис. 3 представлен общий вид аккумулятора тип 2 с замораживанием воды в емкости вследствие кипения хладагента внутри теплообменной поверхности, выполненной из медных труб в виде спиралей [12].

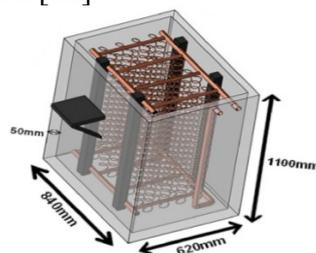


Рис. 3. Общий вид аккумулятора холода с замораживанием воды в емкости [12]

Fig. 3. General view of the cold storage with water freezing in the tank [12]

Масса замораживаемой воды порядка 350 кг, аккумулирующая емкость 32 кВтч, холодопроизводительность примерно 6,5 кВт. По исследованиям авторов [12] использование этого аппарата в СКВ обеспечивает в условиях Тайваня снижение расходов на электроэнергию на 11%. Авторы [13] выполнили исследования и предлагают льдоаккумуляторы второго типа, предназначенные для применения в жилых помещениях. Конструкция устройства состоит из чередующихся полиэтиленовых пакетов со льдом в виде параллелепипедов и проточных каналов для теплоносителя, рис. 4. Его емкость составляет 20 кВтч, масса льда 216 кг.

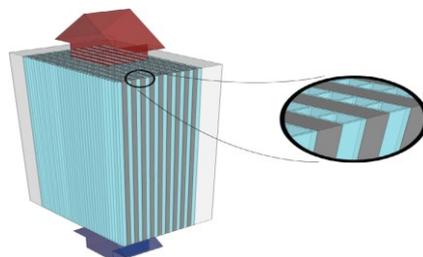


Рис. 4. Общий вид конструкции льдоаккумулятора с чередующимися параллелепипедами из полиэтилена для воды и каналами для циркуляции теплоносителя [13]

Fig. 4. General view of the ice storage design with alternating parallelepipeds made of polyethylene for water and channels for coolant circulation [13]

Использование аппарата обеспечивает замещение электрической нагрузки мощностью 4,2 кВт в течение более 2,3 ч. В качестве теплоносителя рассматривается водный раствор пропиленгликоля концентрацией 40 масс %. Авторы считают достоинством

данного устройства большую площадь теплообмена в сочетании с короткой характерной длиной самого накопителя энергии. Это позволяет достичь высоких тепловых потоков при относительно низкой разнице температур. По всей видимости аккумуляторы второго типа могут быть реализованы при их относительно небольших емкости и холодопроизводительности, составляющей не более 10–15 кВт. В данном сегменте Q_0 аппараты этого типа могут составить конкуренцию льдоаккумуляторам других конструкций. В доступных источниках информации не обнаружено сведений о массовом выпуске аккумуляторов второго типа.

Рассмотрим третий тип водо-ледных аккумуляторов холода. В данных аппаратах контейнеры с водой, являющейся теплоаккумулирующим веществом, располагаются в емкости с циркулирующим через нее теплоносителем. Контейнеры, выполняемые как правило из полиэтилена, могут быть различной формы. Преимущество отдается сферической и цилиндрической формам. Ряд компаний [28,29] выпускают аккумуляторы теплоты и холода такой конструкции. Они предлагаются с различными веществами с фазовым переходом с широким диапазоном температур накопления энергии, -100°C до $+885^{\circ}\text{C}$. Вода как ВФП в каталогах компаний отсутствует. В Турции в системе кондиционирования воздуха гипермаркета реализован рассматриваемый аппарат с водой в качестве ВФП [30]. Его применение обеспечило сокращение на 3900 кВтч (47%) ежедневной нагрузки СКВ, эксплуатационные расходы уменьшились на 60%, инвестиционные затраты окупались за 3 летних сезона. Аппарат представляет собой резервуар высотой 8 м и диаметром 4 м, заполненный 85 000 контейнерами со льдом диаметром 110 мм.

Обсуждение результатов. Авторы настоящей работы выполнили исследование теплообмена при плавлении водного льда в сферических колбах внутренним диаметром 64 мм, обтекаемых теплоносителем-водным раствором пропиленгликоля концентрацией 40 масс %. Полученные экспериментальные данные зависимости плотности теплового потока (q) от времени представлены на рис. 5. Из опытов следует, что средняя величина q составляет порядка 900 Вт/м^2 . Результаты экспериментов могут быть использованы для оценки эффективности аппаратов третьего типа.

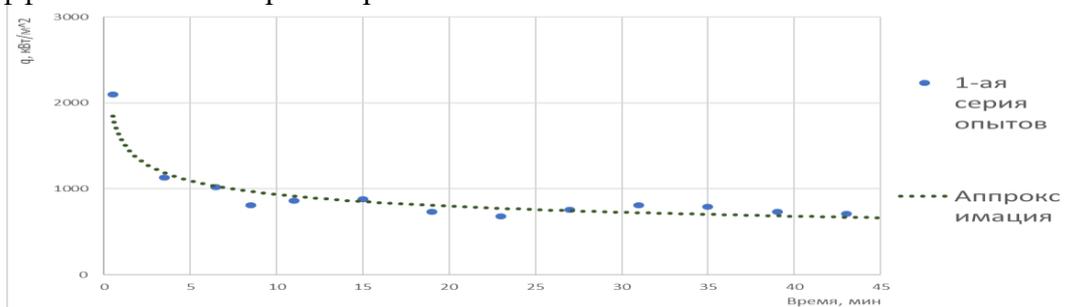


Рис. 5. Зависимость плотности теплового потока от времени при фазовом переходе твердое тело – жидкость для дистиллированной воды

Fig. 5. Time dependence of heat flux density at the solid-liquid phase transition for distilled water

Выполним сопоставление технических характеристик рассмотренных типов водо-ледных аккумуляторов холода в различных диапазонах их емкости и холодопроизводительности. Из каталогов и описаний на сайтах фирм производителей сделана следующая выборка. Максимальная емкость льдоаккумуляторов тип 1 достигает 2067 кВтч (22 300 кг льда), в генераторах ледяной воды ее максимальная величина 12276 кВтч [22]. У изделий аккумулялирующей емкостью 2067 кВтч длина труб испарителя (диаметр 20 мм) достигает 4000 м [24]. При трубчато-змеевиковом исполнении масса испарителя составляет более 50% от массы не заполненного аппарата [16]. При емкости аккумулятора тип 1 1260 кВтч (13500 кг льда) его холодопроизводительность находится в пределах 100–300 кВт [19]. Очевидно, что нижнее значение соответствует охлаждению воды до $1-2^{\circ}\text{C}$, а верхнее - $7-10^{\circ}\text{C}$. Удельная металлоемкость аппаратов первого типа находится в пределах $3-5,8 \text{ кг/кВтч}$ [11, 16, 22]. Она уменьшается по мере роста единичной емкости аппаратов. Из имеющихся в распоряжении каталогов следует, что удельный объем

аппаратов ($\text{дм}^3/\text{кВтч}$) изменяется в широком диапазоне, в зависимости от производителя. Минимальное значение этого показателя $21 \text{ дм}^3/\text{кВтч}$ у изделий производства [22], максимальная величина составляет $44,5 \text{ дм}^3/\text{кВтч}$ [20]. Отношение массы льда к общей массе воды в аппаратах с трубчато-змеевиковыми испарителями 37–39%, в конструкциях аппаратов с пластинчатыми испарителями объем льда составляет 80% от общего объема бака [22]. Расчетные величины изделий второго (рис. 4, [13]) и третьего типа. Удельная металлоемкость составляет $1,1\text{--}2,0 \text{ кг}/\text{кВтч}$. Удельный объем аппаратов второго типа порядка $17 \text{ дм}^3/\text{кВтч}$, третьего типа- $24 \text{ дм}^3/\text{кВтч}$ (сферические контейнеры) и $15 \text{ дм}^3/\text{кВтч}$ (цилиндрические контейнеры).

Обсуждение результатов. Из приведенных результатов следует, что льдоаккумуляторы второго и третьего типа компактнее аппаратов первого типа. В связи с отсутствием металлической теплообменной поверхности их удельная металлоемкость ниже в $1,5\text{--}3$ раза. Создаваемый тепловой поток рассматриваемых устройств (Q_0), как и любых теплообменных аппаратов, в первую очередь определяется площадью теплообменной поверхности, с которой в данном случае связана масса замораживаемой воды. На Q_0 влияют также геометрия теплообменной поверхности, температурный напор при теплообмене, условия кипения хладагента, скорости движения сред и их свойства. Поэтому холодопроизводительность льдоаккумуляторов, являющаяся условием потребителя, может изменяться в широких пределах при заданной теплообменной поверхности [19]. В связи с изложенным оценка и сопоставление эффективности разных типов аппаратов по величине Q_0 носит несколько условный характер. Удельной величиной может являться холодопроизводительность на единицу емкости аккумулятора в $\text{кВт}/\text{кВтч}$, однозначно определяемая массой водного льда. Только один российский производитель [19] указал в каталоге Q_0 , ее удельная величина (q_0) лежит в пределах $0,08\text{--}0,26 \text{ кВт}/\text{кВтч}$. Расчетные величины q_0 аппаратов второго и третьего типов для систем кондиционирования воздуха составляют $0,2\text{--}0,3 \text{ кВт}/\text{кВтч}$.

На основании выполненного анализа можно сделать вывод о том, что эффективность льдоаккумуляторов разных типов по удельной холодопроизводительности примерно одинакова. Из сопоставления технических характеристик льдоаккумуляторов различных типов следует, что аппараты второго и третьего типов имеют ряд преимуществ перед изделиями первого типа. Они компактнее, имеют меньшую в $1,5\text{--}3$ раза металлоемкость. Их эффективность, оцениваемая по условной удельной холодопроизводительности, такая же, как и аппаратов первого типа. Теплоноситель в этих изделиях может быть охлажден не ниже $2\text{--}3 \text{ }^\circ\text{C}$. В указанном диапазоне температур охлаждения теплоносителя и при более высоких значениях его температуры аппараты второго и третьего типов, при их массовом производстве, могут составить конкуренцию льдоаккумуляторам первого типа. Аппараты второго типа, вероятнее всего, могут быть созданы с Q_0 не более 15 кВт , что соответствует емкости примерно 70 кВтч и массе замораживаемого льда 755 кг .

Интерес представляют аккумуляторы третьего типа, в которых теплоаккумулирующее вещество (вода) располагается в контейнерах. Емкость и холодопроизводительность этих аппаратов может достигать достаточно больших величин. Емкость по холоду подобного устройства, установленного в Турции, составляет около 5000 кВтч [31]. Они могут заместить льдоаккумуляторы первого типа в большом числе технологий в силу их простоты и низкой металлоемкости при температурах теплоносителя не ниже $2\text{--}3 \text{ }^\circ\text{C}$. На сегодняшний день нет достаточно большого массива расчетных и экспериментальных данных, которые позволяли бы проектировать аппараты третьего типа оптимальной конструкции и с достоверными характеристиками. Для разработки этих аппаратов необходимы исследования, которые должны включать в себя экспериментальное и численное изучение теплообмена при фазовом переходе лед - вода при различных параметрах. К ним относятся размеры и формы контейнеров со льдом, геометрия размещения контейнеров в емкости и условия их обтекания теплоносителем, величины плотностей тепловых потоков.

На основании полученных результатов следует разработать рациональную математическую модель для расчета льдоаккумуляторов третьего типа, которая позволяла бы проектировать аппараты оптимальной конструкции для заданных условий охлаждения.

Вывод. Выполненный анализ позволяет сформулировать следующие выводы.

Известны три вида водо-ледных аккумуляторов холода. Намораживание льда из потока воды на теплообменной поверхности, при этом вода также является теплоносителем (тип 1); замораживание воды во всем объеме емкости (тип 2); замораживание воды в контейнерах, омываемых теплоносителем (тип 3). Удельная металлоемкость аппаратов первого типа находится в пределах 3–5,8 кг/кВтч, второго и третьего типа - 1,1–2,0 кг/кВтч. Меньшие величины этого параметра у последних обусловлены отсутствием в них металлической теплообменной поверхности.

Эффективность льдоаккумуляторов всех трех типов по удельной холодопроизводительности примерно одинакова и находится в пределах 0,08–0,3 кВт/кВтч. В изделиях второго и третьего типов теплоноситель может быть охлажден не ниже 2–3 °С. В указанном диапазоне температур охлаждения теплоносителя и при более высоких значениях его температуры эти аппараты, при их массовом производстве, могут составить конкуренцию льдоаккумуляторам первого типа. Емкость аккумуляторов второго типа ограничена величиной примерно 70 кВтч. Интерес представляют аккумуляторы третьего типа, емкость которых может достигать значительных величин. Для их создания необходимо выполнить комплекс аналитических и экспериментальных исследований, включающий в себя изучение теплообмена при фазовом переходе лед-вода и разработку математической модели, которая позволяла бы рассчитывать аппараты в оптимальном конструктивном исполнении.

Библиографический список:

1. Sarbu, I., Sebarchievici, C. A Comprehensive Review of Thermal Energy Storage // Sustainability, 2018, № 10(1), p. 191. <https://doi.org/10.3390/su10010191>.
2. Luisa F. Cabeza, Alvaro de Gracia, Gabriel Zsembinszki, Emiliano Borri. Perspectives on thermal energy storage research // Energy. 2021, Vol. 231. DOI: 10.1016/j.energy.2021.120943
3. Jose Pereira da Cunha, Philip Eames, Thermal energy storage for low and medium temperature applications using phase change materials – A review//Applied Energy, 2016;177:227-238, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.05.097>
4. Md. Shahriar Mohtasim, Barun K. Das. Biomimetic and bio-derived composite Phase Change Materials for Thermal Energy Storage applications: A thorough analysis and future research directions. Review article//Journal of Energy Storage 84 (2024) 110945. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.110945>.
5. Eneja Osterman, Uroš Stritih. Review on compression heat pump systems with thermal energy storage for heating and cooling of buildings//Journal of Energy Storage 39 (2021) 102569. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102569>.
6. Козлов Д.В. Моделирование ледовых явлений: учебное пособие. – М., 2020. – 145 с.
7. Bader Al-Aifan B., Parameshwaran R., Mehta K., Karunakaran R., Performance evaluation of a combined variable refrigerant volume and cool thermal energy storage system for air conditioning applications // International Journal of Refrigeration, №76, 2017, 271–295 с., doi: 10.1016/j.ijrefrig.2017.02.008.
8. Mohit Barthwal, Atul Dhar, Satvasheel Powar. The techno-economic and environmental analysis of genetic algorithm (GA) optimized cold thermal energy storage (CTES) for air-conditioning applications// Applied Energy 283 (2021) 116253. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116253>
9. Sanaye S, Hekmatian M. Ice thermal energy storage (ITES) for air-conditioning application in full and partial load operating modes// Int J Refrig 2016;66:181–197. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2015.10.014
10. Emamzadeh Abolghasem, Ataei Abtin. A comparative study on PCM and ice thermal energy storage tank for air-conditioning systems in office buildings// Appl Therm Eng 2016.96:391–9. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2015.11.107
11. [Электронный ресурс]. URL: <https://orelholodmash.ru/product/cat/ldoakkumulyatory/>
12. Kai-Shing Yang, Yun-Sheng Chao, Chia-Hsing Hsieh, Chi-Chuan Wang. A novel hybrid ice storage design applicable for commercial showcase with refrigerator and freezer//Journal of Energy Storage 68 (2023) 107898. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.107898>.
13. Andrea Mammoli, Matthew Robinson. Numerical analysis of heat transfer processes in a low-cost, high-performance ice storage device for residential applications// Applied Thermal Engineering 128 (2018) 453–463. <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.09.043>.

14. A. Palacios a, M.E. Navarro-Rivero, B. Zou, Z. Jiang, M.T. Harrison, Y. Ding. A perspective on Phase Change Material encapsulation: Guidance for encapsulation design methodology from low to high-temperature thermal energy storage applications//Journal of Energy Storage 72 (2023) 108597. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108597>.
15. Бабакин Б.С., Воронин М.И., Семенов Е.В., Бабакин С.Б., Белозеров А.Г., Сучков А.Н. Теоретическое обоснование процесса охлаждения жидкости замороженными телами с развитой поверхностью//Вестник Международной академии холода. - 2019. - №2. - С.98–101. DOI: 10.17586/160643132019182-95-101.
16. [Электронный ресурс]. URL: <https://aircool.ru/>
17. https://termoservice63.ru/gienierator_liedianoj_vody_ldoakkumuljator_stoimost?etext=2202.4lSy9V4uxwyNL5_YfDp65roVuUFweyx32muuYJh4KjsJNDQIT4JP3PUwGB-qwIrsWVGfZ4usLPh0n8AqFv-d542_5ZKZHcwMj5WEAkLlvZRHLKoS9BID3K_7RDWp5WzY2Z0dG1keXJlc2FseGNwaw.de31e0a9b4fbc7dd827b8266500744e6fc81fc86&yclid=8033288342965583871 [Электронный ресурс].
18. URL: https://phs-holod.ru/manufacture/teplobmen_oborudovanie/ystanovki_s_OAL.html [Электронный ресурс].
19. URL: <https://www.tehnofrost.com/ru/catalog/produksiya-tehnofrost/oborudovanie-dlya-ledyanoy-vody/> [Электронный ресурс].
20. [Электронный ресурс]. URL: <https://minus.su/>
21. [Электронный ресурс]. URL: https://www.arktikal.ru/refrigerating_machinery/1096/
22. URL: https://molokoice.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=48&Itemid=54 [Электронный ресурс].
23. Гончарова Г.Ю., Пытченко В.П., Борзов С.С., Борщев Г.В. Исследование процессов теплообмена при пленочном обтекании ледовых поверхностей с фазовым переходом на границе раздела // Вестник Международной академии холода. – 2021. – № 4. – С. 3–11. – DOI 10.17586/1606-4313-2021-20-4-3-11.
24. Goncharova G. Yu., Korolev I. A., Borschev G. V. Performance of an Ice Bank with Falling Film Flow around a Melting Surface//Russian Engineering Research. – 2023. – Vol. 43, No. 11. – P. 1386-1392. – DOI 10.3103/s1068798x23110114.
25. [Электронный ресурс]. URL: https://mayekawa.com/products/ice_storage/
26. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.made-in-china.com/factory/ice-cold-storage.html>
27. [Электронный ресурс]. URL: https://www.europages.co.uk/companies/ice_water_cold_storage_systems.html
28. Cristopia Energy Systems - Air Conditioning Systems India [Электронный ресурс]. URL: <https://cristopiaairconditioningsystemsindia.wordpress.com/>
29. Phase Change Material Products Limited: [Электронный ресурс]. URL: <http://www.pcmproducts.net/>
30. Dogan Erdemir, Necdet Altuntop, Yunus A. Çengel. Experimental investigation on the effect of ice storage system on electricity consumption cost for a hypermarket//Energy&Buildings 251(2021)111368.
31. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111368>.

References:

1. Sarbu, I., Sebarchievici, C. A Comprehensive Review of Thermal Energy Storage. *Sustainability*, 2018;10(1): 191. <https://doi.org/10.3390/su10010191>.
2. Luisa F. Cabeza, Alvaro de Gracia, Gabriel Zsembinszki, Emiliano Borri. Perspectives on thermal energy storage research. *Energy*. 2021; 231. DOI: 10.1016/j.energy.2021.120943
3. Jose Pereira da Cunha, Philip Eames, Thermal energy storage for low and medium temperature applications using phase change materials – A review. *Applied Energy*, 2016;177:227-238., <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.05.097>
4. Md. Shahriar Mohtasim, Barun K. Das. Biomimetic and bio-derived composite Phase Change Materials for Thermal Energy Storage applications: A thorough analysis and future research directions. Review article. *Journal of Energy Storage*. 2024; 84:110945. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.110945>.
5. Eneja Osterman, Uroš Stritih. Review on compression heat pump systems with thermal energy storage for heating and cooling of buildings. *Journal of Energy Storage*. 2021;39:102569. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102569>.
6. Kozlov D.V. Modeling ice phenomena: Textbook, 2020. (In Russ)
7. Bader Al-Aifan B., Parameshwaran R., Mehta K., Karunakaran R., Performance evaluation of a combined variable refrigerant volume and cool thermal energy storage system for air conditioning applications. *International Journal of Refrigeration*. 2017; 76:271–295 c., doi: 10.1016/j.ijrefrig.2017.02.008.
8. Mohit Barthwal, Atul Dhar, Satvasheel Powar. The techno-economic and environmental analysis of genetic algorithm (GA) optimized cold thermal energy storage (CTES) for air-conditioning applications. *Applied Energy*. 2021; 283:116253. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116253>
9. Sanaye S, Hekmatian M. Ice thermal energy storage (ITES) for air-conditioning application in full and partial load operating modes. *International Journal of Refrigeration*. 2016;66:181–197. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2015.10.014

10. Emamzadeh Abolghasem, Ataei Abtin. A comparative study on PCM and ice thermal energy storage tank for air-conditioning systems in office buildings. *Appl Therm Eng.* 2016; 96:391–9. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2015.11.107
11. URL: <https://orelholodmash.ru/product/cat/ldoakkumulyatory/>
12. Kai-Shing Yang, Yun-Sheng Chao, Chia-Hsing Hsieh, Chi-Chuan Wang. A novel hybrid ice storage design applicable for commercial showcase with refrigerator and freezer. *Journal of Energy Storage.* 2023; 68: 107898. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.107898>.
13. Andrea Mammoli, Matthew Robinson. Numerical analysis of heat transfer processes in a low-cost, high-performance ice storage device for residential applications. *Applied Thermal Engineering.* 2018; 128:453–463. <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.09.043>.
14. A. Palacios a, M.E. Navarro-Rivero, B. Zou, Z. Jiang, M.T. Harrison, Y. Ding. A perspective on Phase Change Material encapsulation: Guidance for encapsulation design methodology from low to high-temperature thermal energy storage applications. *Journal of Energy Storage.* 2023;72:108597. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108597>.
15. Babakin B.S., Voronin M. I., Semenov E.V., Babakin S.B., Belozero A.G., Suchkov A.N. Substantiation of liquid cooling by introducing the frozen balls with developed surface. *Journal of the International Academy of Refrigeration.* 2019; 2: 95–101. DOI: 10.17586/1606-4313-2019-18-2-95-101. (In Russ)
16. URL: <https://aircool.ru/>
17. URL:https://termoservice63.ru/gienierator_liedianoj_vody_ldoakkumulator_stoimost?etext=2202.41Sy9V4uxwyNL5_YfDp65roVuUFweyx32muuYJh4KjsJNDQIT4JP3PUwGB-qwIrsWVGfZ4usLPh0n8AqFv-d542_5ZKZHcwMj5WEAKLlvZRHLLKoS9BID3K_7RDWp5WzY2Z0dG1keXJ1c2FseGNwaw.de31e0a9b4fbc7dd827b8266500744e6fc81fc86&yclid=8033288342965583871
18. URL:https://phs-holod.ru/manufacture/teplobmen_oborudovanie/ystanovki_s_OAL.html
19. URL:<https://www.tehnofrost.com/ru/catalog/produksiya-tehnofrost/oborudovanie-dlya-ledyanoy-vody/>
20. URL: <https://minus.su/>
21. URL: https://www.arktikal.ru/refrigerating_machinery/1096/
22. URL:https://molokoice.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=48&Itemid=54
23. Goncharov G. Yu., Pytchenko V. P., Borzov S. S., Borschev G. V. Heat and mass transfer during film flow around ice surfaces with a phase transition at the interface. *Journal of the International Academy of Refrigeration.* 2021; 4: 3-11. -DOI 10.17586/1606-4313-2021-20-4-3-11. (In Russ)
24. Goncharova G.Yu., Korolev I.A., Borschev G.V. Performance of an Ice Bank with Falling Film Flow around a Melting Surface. *Russian Engineering Research.* 2023;43(11):386-1392. DOI 10.3103/s1068798x23110114.
25. URL: https://mayekawa.com/products/ice_storage/
26. URL: <https://www.made-in-china.com/factory/ice-cold-storage.html>
27. URL: https://www.europages.co.uk/companies/ice_water_cold_storage_systems.html
28. Cristopia energy systems. URL: <https://cristopiaairconditioningsystemsindia.wordpress.com/>
29. Phase Change Material Products Limited. URL: <http://www.pcmproducts.net/>
30. Dogan Erdemir, Necdet Altuntop, Yunus A. Çengel. Experimental investigation on the effect of ice storage system on electricity consumption cost for a hypermarket. *Energy & Buildings.*2021;251:111368.
31. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111368>.

Сведения об авторах:

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

Вячеслав Викторович Тамаров, магистрант; vtamarov@itmo.ru, ORCID: 0009-0003-7748-8569

Матвей Владимирович Короленко, аспирант; mvkorolenko@itmo.ru, ORCID: 0009-0001-6186-6583

Information about authors:

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

Viacheslav V. Tamarov, Master Student; vtamarov@itmo.ru, ORCID: 0009-0003-7748-8569

Matvey V. Korolenko, Graduate student; mvkorolenko@itmo.ru, ORCID: 0009-0001-6186-6583

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 14.10.2024.

Одобрена после рецензирования/ Revised 01.11.2024.

Принята в печать/Accepted for publication 01.11.2024.

ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА
ENERGY AND ELECTRICAL ENGINEERING

УДК 621.362: 537.322

DOI: 10.21822/2073-6185-2024-51-4-15-22



Оригинальная статья /Original article

**Термоэлектрическая система для охлаждения и кондиционирования воздуха
в салоне легкового автотранспорта**

О.В. Евдулов, М.И. Микаилов, Р.М. Магомедов

Дагестанский государственный технический университет,
367015, г. Махачкала, пр. И. Шамиля, 70, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является разработка конструкции термоэлектрической системы (ТЭС) для охлаждения и кондиционирования воздуха в салоне легкового автотранспорта, ее расчет, анализ параметров и электро- и теплофизических характеристик. **Метод.** Исследование основано на методах натурального и вычислительного моделирования систем кондиционирования и жизнеобеспечения с целью поиска оптимальных решений по экономичности, надежности и ресурсу низкотемпературных установок, машин и аппаратов. **Результат.** Произведен расчет ТЭС и определены ее параметры. Получены зависимости, описывающие основные характеристики ТЭС и ТЭМ, входящих в ее состав. Построены графики зависимости: изменения средней температуры в объеме салона автотранспорта, а также теплообменных систем во времени, мощности, холодильного коэффициента, напряжения питания ТЭМ от перепада температур между спаями для различных значений тока питания, вольт-амперная характеристика для различных величин перепада температур между спаями, изменение температуры на холодном спае ТЭМ от тока питания. Графики представлены при температуре горячих спаев ТЭМ 320 К. **Вывод.** Определены параметры установки: количество ТЭМ типа ТВ-199-1,4-1,5 - 18 шт, рабочий диапазон мощностей единичного ТЭМ - от 17 до 40 Вт при среднем перепаде температур между спаями 50 К, ток питания - от 2 до 6 А при потребляемой мощности от 40 до 130 Вт, холодильный коэффициент - от 0,17 до 0,7.

Ключевые слова: легковой автотранспорт, охлаждение, кондиционирование воздуха, термоэлектрическая система, термоэлектрический кондиционер, термоэлектрический модуль, температура, расчет

Для цитирования: О.В. Евдулов, М.И. Микаилов, Р.М. Магомедов. Термоэлектрическая система для охлаждения и кондиционирования воздуха в салоне легкового автотранспорта. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2024; 51(4):15-22. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-4-15-22

Thermoelectric system for cooling and air conditioning in passenger cars

O.V. Evdulov, M.I. Mikailov, R.M. Magomedov

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

Abstract. Objective. The aim of the study is to develop a design of a thermoelectric system (TES) for cooling and air conditioning in the passenger compartment of a car, its calculation, analysis of parameters and electrical and thermal characteristics. **Method.** The study is based on the methods of natural and computational modeling of air conditioning and life support systems in order to find optimal solutions for efficiency, reliability and service life of low-temperature installations, machines and devices. **Result.** The TES has been calculated and its parameters have been determined. Dependencies describing the main characteristics of the TES and the TEM included in its composition have been obtained. The following dependence graphs have been constructed: changes in the average temperature in the volume of the vehicle cabin, as well as heat exchange systems over time, power, coefficient of performance, TEM supply voltage

from the temperature difference between junctions for different values of the supply current, volt-ampere characteristic for different values of the temperature difference between junctions, change in temperature at the cold junction of the TEM from the supply current. The graphs are presented at a temperature of hot junctions of the TEM of 320 K. **Conclusions.** The parameters of the installation are defined: the number of TEM type TB-199-1.4-1.5 - 18 pcs., the operating power range of a single TEM is from 17 to 40 W with an average temperature difference between the junctions of 50 K, the supply current is from 2 to 6 A with a power consumption of 40 to 130 W, the cooling coefficient is from 0.17 to 0.7.

Keywords: passenger cars, cooling, air conditioning, thermoelectric system, thermoelectric air conditioner, thermoelectric module, temperature, calculation

For citation: O.V. Evdulov, M.I. Mikailov, R.M. Magomedov. Thermoelectric system for cooling and air conditioning in passenger cars. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2024; 51(4):15-22. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-4-15-22

Введение. В настоящее время одной из важных задач при проектировании различных транспортных систем является обеспечение комфортных условий в зоне нахождения человека. В легковом автотранспорте данная задача решается путем использования специальных средств создания микроклимата и кондиционирования воздуха в салоне автомобиля. В большинстве случаев данные системы реализуются на основе фреоновых охлаждающих агрегатов компрессионного типа, несмотря на относительно высокий коэффициент полезного действия, имеющих недостаточную экологичность и во многих случаях надежность при чрезвычайных ситуациях (сбой в работе двигателя автомобиля, авария). В этих условиях в последнее время уделяется большое внимание проектированию термоэлектрических систем охлаждения и кондиционирования воздуха и их эффективному использованию для транспортных средств [1-5]. Данное обстоятельство связано с рядом преимуществ термоэлектрического метода преобразования энергии, к которым, прежде всего, относится его высокая экологичность, надежность при эксплуатации, бесшумность, возможность быстрого перехода из режима охлаждения в режим нагрева и, наоборот, значительный ресурс работы, малая инерционность [6-9].

В виду невысокого коэффициента полезного действия термоэлектрических преобразователей энергии наиболее рациональной областью применения термоэлектрических систем кондиционирования воздуха являются малогабаритные транспортные средства (в основном легковые автомобили), где величина холодопроизводительности термоэлектрического модуля (ТЭМ) не будет превышать 1 кВт [10-12].

Постановка задачи. Целью настоящей работы является разработка конструкции термоэлектрической системы для охлаждения и кондиционирования воздуха в салоне легкового автотранспорта, ее расчет, анализ параметров и электро- и теплофизических характеристик.

Методы исследования. Авторами разработана термоэлектрическая система (ТЭС) для охлаждения и кондиционирования воздуха в салоне легкового автотранспорта, не требующая серьезного изменения системы воздухопроводов и посадочных мест в машине, что расширяет возможности ее использования для конструкций автомобилей, которые в серийной комплектации не предусматривают установки специальной системы контроля и регулирования микроклимата.

Конструкция ТЭС изображена на рис. 1. Установка содержит радиатор, компрессор, термоэлектрический кондиционер (ТЭК) и электрогенератор. Кроме этого в состав системы входит дополнительный жидкостной теплообменник, устанавливаемый перед штатным радиатором автотранспорта. От него теплоотводящая жидкость прокачивается с помощью компрессора через ТЭК, омывая горячие спаи ТЭМ.

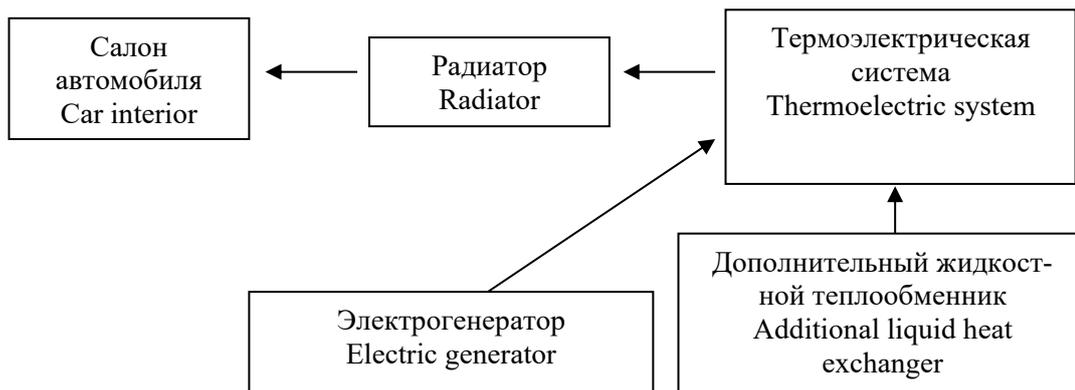


Рис. 1. Блок-схема термоэлектрической системы для охлаждения и кондиционирования воздуха в салоне легкового автотранспорта
Fig. 1. Block diagram of a thermoelectric system for cooling and air conditioning in the passenger compartment of a passenger vehicle

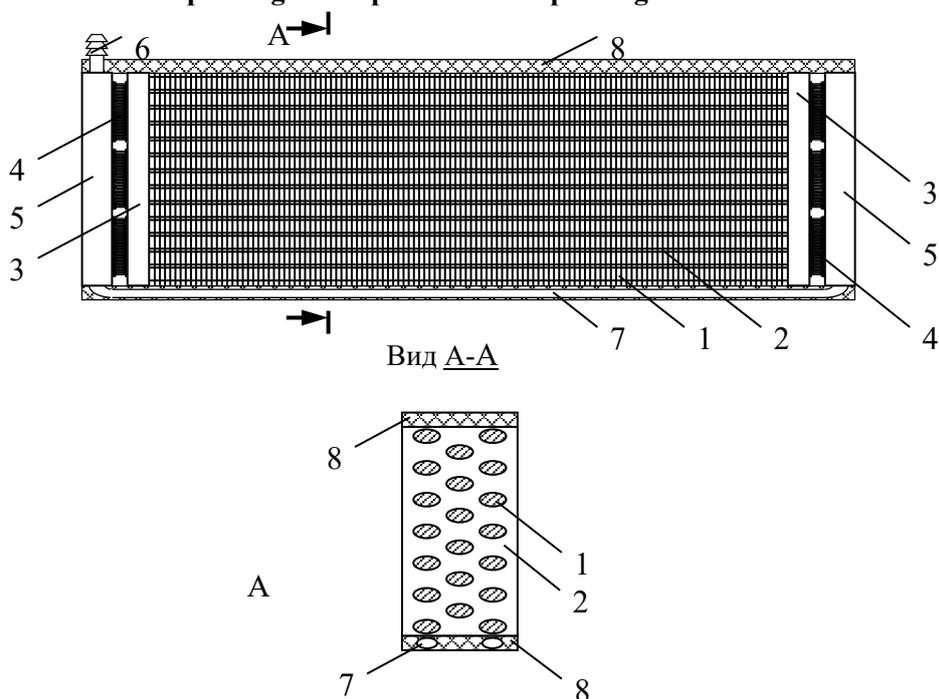


Рис. 2. Конструкция термоэлектрического кондиционера
Fig. 2. Construction of a thermoelectric air conditioner

Термоэлектрический кондиционер содержит теплообменник, представляющий собой наборную конструкцию, состоящую из алюминиевых штырей 1, расположенных в шахматном порядке, на которые с небольшим зазором плотно надеты тонкие алюминиевые пластины 2.

Концы алюминиевых штырей 1 запрессованы в две контактные пластины 3, выполненные из алюминия. Со сторон, противоположных алюминиевым штырям 1, контактные пластины 3 находятся с рабочими спаями ТЭМ ТЭК 4. Отвод теплоты с опорных спаев ТЭМ осуществляется с помощью жидкостных теплоотводов 5.

Для циркулирования теплоотводящей жидкости один из теплоотводов 5 снабжен штуцерами 6 и соединяется с другим теплоотводом при помощи трубки 7. Для исключения теплоперетоков кондиционер по бокам изолирован теплоизоляцией 8.

В рабочем режиме ТЭМ 4 охлаждает контактные пластины 3 и, соответственно, алюминиевые штыри 1. Тонкие алюминиевые пластины 2 играют роль ребер радиатора, которые обдуваются штатным вентилятором печки обогрева салона автотранспорта. Охлажденный воздух поступает в салон по штатным воздуховодам. Отвод тепла от горячих спаев ТЭМ осуществляется теплоотводящей жидкостью, омывающей жидкостные

теплоотводы 5. Так как данная система кондиционирования потребляет значительное количество электроэнергии, для ее компенсации на коллектор автомобильного двигателя устанавливается дополнительный электрогенератор (в том числе термоэлектрический). Принудительная циркуляция жидкости обеспечивается компрессором.

Для инженерного расчета ТЭК использована система дифференциальных уравнений, позволяющая оценить в первом приближении динамические характеристики устройства (соответствующая расчетная схема приведена на рис.3) [13]:

$$\begin{cases} \frac{dT_c}{d\tau} = \frac{1}{m_c c_c} [\alpha_c (T_{p1} - T_c) + Q_{вн} + \alpha_{cp} (T_{cp} - T_c)] \\ \frac{dT_{p1}}{d\tau} = \frac{1}{m_{p1} c_{p1}} \left[nS \left[-ejT_{p1} + \frac{1}{2} j^2 \rho h + \frac{\lambda}{h} (T_{p2} - T_{p1}) \right] + \alpha_{cp} (T_{cp} - T_{p1}) \right], \\ \frac{dT_{p2}}{dt} = \frac{1}{m_{p2} c_{p2}} \left[nS \left[ejT_{p1} + \frac{1}{2} j^2 \rho h - \frac{\lambda}{h} (T_{p2} - T_{p1}) \right] - \alpha_{ж} (T_{p2} - T_{ж}) \right] \end{cases}$$

где T_c – температура внутри салона автотранспорта, τ – время, m_c , m_{p1} , m_{p2} и c_c , c_{p1} , c_{p2} – массы и теплоемкости соответственно салона автотранспорта, теплообменника и жидкостных теплоотводов, $Q_{вн}$ – удельная мощность объемных источников теплоты внутри салона автотранспорта, T_{cp} – температура окружающей среды, T_{p1} , T_{p2} – средние температуры теплообменника и жидкостных теплоотводов, α_c – коэффициент теплоотдачи от теплообменника в салон автотранспорта, α_{cp} – коэффициент теплоотдачи в окружающую среду, $\alpha_{ж}$ – коэффициент теплоотдачи от жидкости к жидкостным теплоотводам, n – количество термоэлементов в ТЭМ, S – площадь поперечного сечения ветви термоэлемента, e – коэффициент термо-э.д.с. термоэлементов в ТЭМ, ρ – удельное электрическое сопротивление ТЭМ, h – высота термоэлементов в ТЭМ, λ – коэффициент теплопроводности ветвей термоэлементов, j – плотность электрического тока, протекающего через ТЭМ.

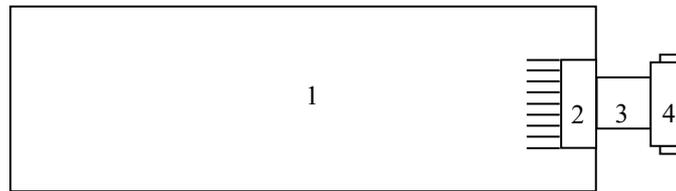


Рис. 3. Расчетная схема кондиционирования воздуха в салоне автотранспорта

1 – салон, 2 – теплообменник, 3 – ТЭМ, 4 – жидкостной теплоотвод

Fig. 3. Calculation scheme of air conditioning in the passenger compartment of a vehicle

1 – passenger compartment, 2 – heat exchanger, 3 – TЭМ, 4 – liquid heat sink

Обсуждение результатов. Результаты расчетов температурного поля в салоне автотранспорта представлены на рис. 4 в виде зависимости изменения средней температуры в объеме салона автотранспорта, а также теплообменных систем (теплообменник и жидкостные теплоотводы) во времени.

Расчет производился при следующих исходных данных: $e = 350 \cdot 10^{-6}$ В/К; $h = 0,002$ м; $\lambda = 1,5$ Вт/м·К; $\rho = 0,0001$ Ом·м; $S = 3 \cdot 10^{-6}$ м², $n = 120$, $I = 5$ А, $c_{p1,2} = 380$ Дж/кг·К; $c_c = 1000$ Дж/кг·К, $T_{cp} = 298$ К, $T_{ж} = 298$ К. Значения α_c , α_{cp} , $\alpha_{ж}$ определялись по известным соотношениям, приведенным, например в [14].

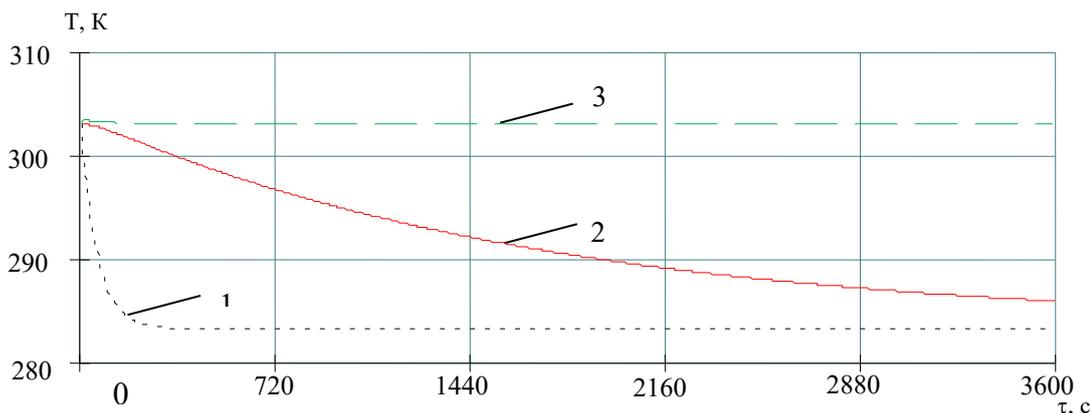


Рис. 4. Изменение во времени контрольных точек системы ТЭК - салон автотранспорта во времени: 1- средняя температура теплообменника, 2 - средняя температура в салоне, 3 - средняя температура жидкостного теплоотвода
Fig. 4. Change in time of control points of the fuel and energy complex system - vehicle interior in time: 1 - average temperature of the heat exchanger, 2 - average temperature in the interior, 3 - average temperature of the liquid heat sink

Составлены графики зависимости: изменение мощности, холодильного коэффициента, напряжения питания ТЭМ от перепада температур между спаями для различных значений тока питания (рис.5-7).

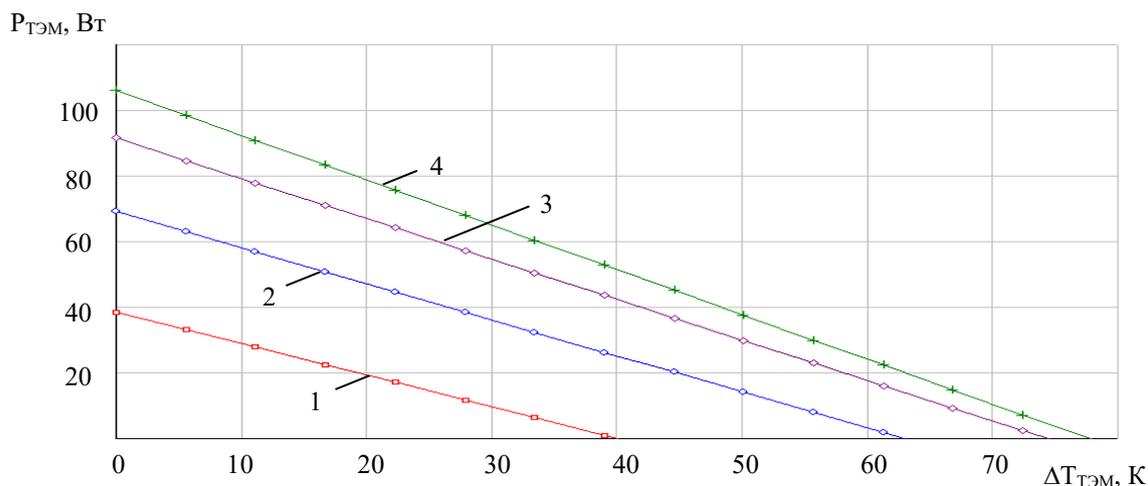


Рис. 5. Зависимость изменения мощности ТЭМ от изменения перепада температур между спаями при различных значениях силы тока питания:
 1 - $I_{ТЭМ}=1,5$ А, 2 - $I_{ТЭМ}=3$ А, 3 - $I_{ТЭМ}=4,6$ А, 4 - $I_{ТЭМ}=6,1$ А
Fig. 5. Dependence of the change in the power of the TEM on the change in the temperature difference between the junctions at different values of the supply current:
 1 - $I_{ТЭМ} = 1.5$ А, 2 - $I_{ТЭМ} = 3$ А, 3 - $I_{ТЭМ} = 4.6$ А, 4 - $I_{ТЭМ} = 6.1$ А

На рис. 5-8 изображены характеристики, используемых в составе ТЭК ТЭМ в количестве 18 шт, типа ТВ-199-1,4-1,5, производитель ООО «Криотерм» (г. Санкт-Петербург) [15].

Данные представлены для температуры горячего спая 320 К, максимальных величинах тока питания $I_{ТЭМ.max}=6,1$ А, мощности одного термомодуля $P_{ТЭМ.max}=94$ Вт, напряжения питания $U_{ТЭМ.max}=24,9$ В, максимального перепада температур $\Delta T_{ТЭМ.max}=70$ К, электрического сопротивления одного термомодуля $R_{ТЭМ}=3,2$ Ом.

Вольт-амперная характеристика для различных величин перепада температур между спаями приведена на рис. 8.

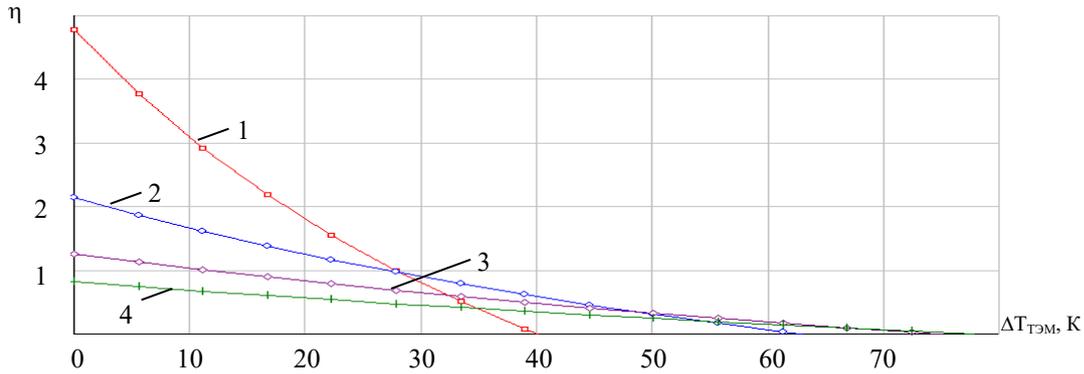


Рис. 6. Зависимость изменения холодильного коэффициента ТЭМ от изменения перепада температур между спаями при различных значениях силы тока питания:
 1- $I_{ТЭМ}=1,5$ А, 2- $I_{ТЭМ}=3$ А, 3 - $I_{ТЭМ}=4,6$ А, 4 - $I_{ТЭМ}=6,1$ А

Fig. 6. Dependence of the change in the refrigeration coefficient of the TEM on the change in the temperature difference between the junctions at different values of the supply current:
 1 - $I_{TEM}=1.5$ A, 2 - $I_{TEM}=3$ A, 3 - $I_{TEM}=4.6$ A, 4 - $I_{TEM}=6.1$ A

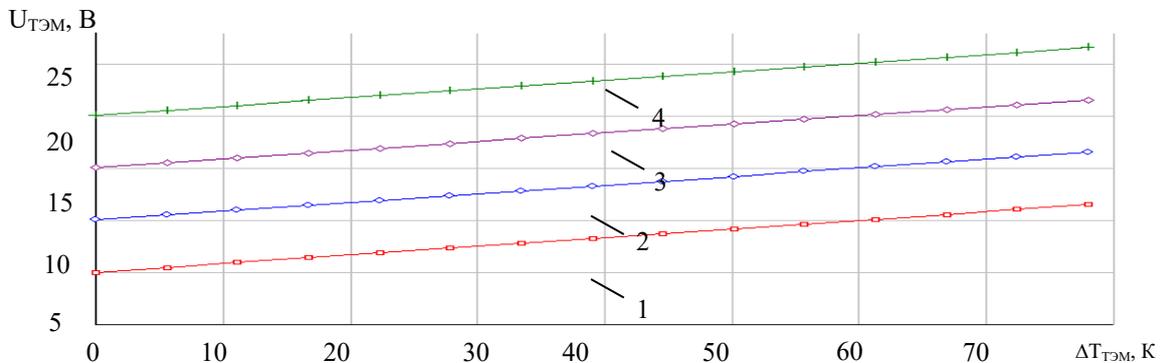


Рис. 7. Зависимость изменения напряжения питания ТЭМ от изменения перепада температур между спаями при различных значениях силы тока питания:
 1- $I_{ТЭМ}=1,5$ А, 2- $I_{ТЭМ}=3$ А, 3 - $I_{ТЭМ}=4,6$ А, 4 - $I_{ТЭМ}=6,1$ А

Fig. 7. Dependence of the change in the supply voltage of the TEM on the change in the temperature difference between the junctions at different values of the supply current:
 1- $I_{TEM}=1.5$ A, 2- $I_{TEM}=3$ A, 3 - $I_{TEM}=4.6$ A, 4 - $I_{TEM}=6.1$ A

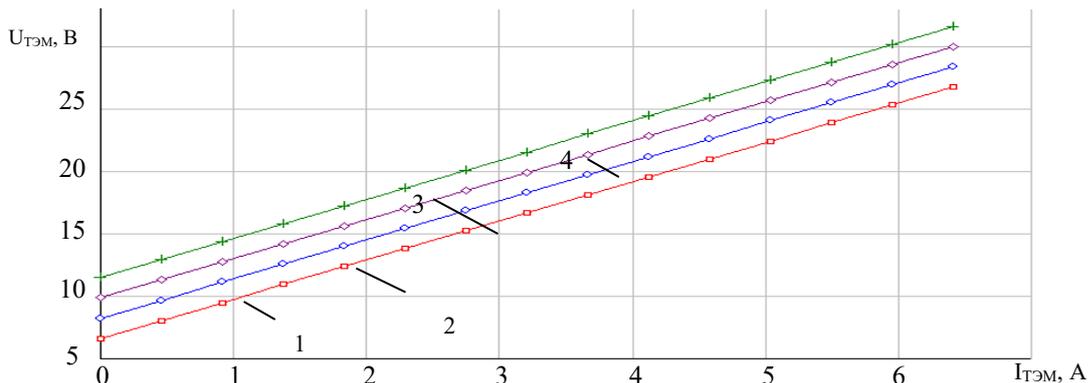


Рис. 8. Зависимость изменения напряжения ТЭМ от изменения величины тока питания при различных значениях перепада температур между спаями:

1- $\Delta T_{ТЭМ} = 20$ К, 2- $\Delta T_{ТЭМ} = 39$ К, 3 - $\Delta T_{ТЭМ} = 59$ К, 4 - $\Delta T_{ТЭМ} = 78$ К

Fig. 8. Dependence of the change in the TEM voltage on the change in the supply current at different values of the temperature difference between the junctions:

1 - $\Delta T_{TEM} = 20$ K, 2 - $\Delta T_{TEM} = 39$ K, 3 - $\Delta T_{TEM} = 59$ K, 4 - $\Delta T_{TEM} = 78$ K

Согласно полученным данным в салоне транспортного средства объемом примерно $2,7 \text{ м}^3$ при использовании ТЭЖ температура с 303 К опускается до величины 293 К примерно за 24 мин. Значение температуры теплообменника стабилизируется примерно за 5 мин и составляет около 284 К . Рабочий диапазон мощностей единичного ТЭМ,

входящего в состав ТЭЖ, будет находиться в пределах от 17 до 40 Вт при среднем перепаде температур между спаями 50 К. Ток питания будет составлять 2-6 А при потребляемой мощности от 40 до 130 Вт. Холодильный коэффициент изменяется в пределах от 0,17 до 0,7.

Вывод. Разработана ТЭС для охлаждения и кондиционирования воздуха в салоне легкового автотранспорта. Прибор содержит радиатор, компрессор, ТЭЖ и электрогенератор. Кроме этого, в состав системы входит дополнительный жидкостной теплообменник, устанавливаемый перед штатным радиатором автотранспорта. От него теплоотводящая жидкость прокачивается с помощью компрессора через ТЭЖ, омывая горячие спаи ТЭМ. Произведен расчет параметров ТЭС, состоящий в расчете температурного поля в салоне автотранспорт, представленные в виде зависимости изменения средней температуры в объеме салона автотранспорта, а также теплообменных систем во времени, параметров ТЭМ, входящих в состав системы. Определены параметры установки: количество ТЭМ типа ТВ-199-1,4-1,5 - 18 шт, рабочий диапазон мощностей единичного ТЭМ - от 17 до 40 Вт при среднем перепаде температур между спаями 50 К, ток питания - от 2 до 6 А при потребляемой мощности от 40 до 130 Вт, холодильный коэффициент - от 0,17 до 0,7.

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

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

Библиографический список:

1. Shi X.-L. J., Zou J., Chen Z.-G. Advanced thermoelectric design: from materials and structures to devices // Chemical reviews. 2020. Vol. 15. P.7399-7515.
2. Snyder G.J., LeBlanc S., Crane D. Distributed and localized cooling with thermoelectrics, [et al.] // Future energy. 2021. Vol. 5. P. 748-51.
3. Vasil'ev E.N. The effect of thermal resistances on the coefficient of performance of a thermoelectric cooling system // Technical Physics. 2021. Vol. 66. P. 720-724.
4. Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Магомедов Р.А.-М. Охлаждающие системы на базе сильноточных термоэлектрических полупроводниковых преобразователей. СПб.: Политехника, 2020. 285 с.
5. Драбкин И.А., Ершова Л.Б. Гибридные режимы работы термоэлектрических модулей // Физика и техника полупроводников. 2022. № 1. С.13-17.
6. Kuzichkin O.R., Vasilyev G.S., Surzhik D.I. Method for modeling dynamic modes of nonlinear control system for thermoelectric modules. *Advances in Dynamical Systems and Applications* 2020; 15(2):187-197.
7. Абоуеллаиль А.А., Чан Ц., Солдатов А.И., Солдатов А.А., Костина М.А., Борталевич С.И., Солдатов Д.А. Лабораторное обоснование термоэлектрического метода контроля переходного сопротивления контактов //Дефектоскопия. 2022. № 12. С. 70-78.
8. Евдулов О.В., Магомедова С.Г., Миспахов И.Ш., Набиев Н.А., Насрулаев А.М. Термоэлектрическая система для извлечения инородных объектов из тела человека // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019. т. 46, № 1. С. 32-41.
9. Ибрагимова А.М., Евдулов О.В. Термоэлектрические полупроводниковые устройства для отвода теплоты от элементов РЭА//Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке: статья в сборнике научных трудов X Международной научно-технической конференции (Санкт-Петербург, 27–29 окт. 2021 г.). СПб., 2021. С.12-15.
10. Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Казумов Р.Ш. Экспериментальные исследования термоэлектрических теплообменных аппаратов проточного типа с тепловыми мостиками // Вестник Международной академии холода. 2010. № 4. С. 5-7.
11. Исмаилов Т.А., Евдулов Д.В., Евдулов О.В. Системы отвода теплоты от элементов РЭА на базе плавающих тепловых аккумуляторов // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2015. № 1 (36). С. 38-44.
12. Goldsmid H.J. Thermoelectric refrigeration, New York: Springer, 2013. 240 p.
13. Васильев Е.Н. Расчет и оптимизация теплообменников термоэлектрического блока охлаждения // Теплофизика и аэромеханика. 2022. т. 29, № 3. С.419-430.
14. Теория тепломассообмена / Под. ред. А.И. Леонтьева. - М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018. 464 с.
15. <http://www.kryotherm.ru> (дата доступа 15.09.2024).

References:

1. Shi X.-L. J., Zou J., Chen Z.-G. Advanced thermoelectric design: from materials and structures to devices. *Chemical reviews*. 2020;15:7399-7515.
2. Snyder G.J., LeBlanc S., Crane D. Distributed and localized cooling with thermoelectrics, [et al.] *Future en-ergy*. 2021; 5:748-51.
3. Vasil'ev E.N. The effect of thermal resistances on the coefficient of performance of a thermoelectric cooling system. *Technical Physics*. 2021;66:720-724 (In Russ)
4. Ismailov T.A., Evdulov O.V., Magomadov R.A.-M. Cooling systems based on high-current thermoelectric semiconductor converters. SPb.: Politekhnik, 2020;285(In Russ)
5. Drabkin I.A., Ershova L.B. Hybrid operating modes of thermoelectric modules. *Physics and Engineering of Semiconductors*. 2022;1:13-17(In Russ)
6. Kuzichkin O.R., Vasilyev G.S., Surzhik D.I. Method for modeling dynamic modes of nonlinear control system for thermoelectric modules. *Advances in Dynamical Systems and Applications*. 2020;15(2):187-197.
7. Abouelail A.A., Chan Ts., Soldatov A.I., Soldatov A.A., Kostina M.A., Bortalevich S.I., Soldatov D.A. Laboratory substantiation of the thermoelectric method for monitoring the transition resistance of contacts . *Defectoscopy*. 2022;12:70-78.
8. Evdulov O.V., Magomedova S.G., Mispakhov I.Sh., Nabiev N.A., Nasrulaev A.M. Thermoelectric system for extracting foreign objects from the human body. *Herald of the Dagestan State Technical University. Technical sciences*. 2019; 46(1): 32-41. (In Russ)
9. Ibragimova A.M., Evdulov O.V. Thermoelectric semiconductor devices for heat removal from electronic equipment elements // Low-temperature and food technologies in the 21st century: article in the collection of scientific papers of the X International Scientific and Technical Conference (St. Petersburg, October 27-29, 2021). SPb., 2021;12-15. (In Russ)
10. Ismailov TA, Evdulov OV, Kazumov R.Sh. Experimental studies of flow-type thermoelectric heat exchangers with thermal bridges. *Bulletin of the International Academy of Refrigeration*. 2010; 4:5-7. (In Russ)
11. Ismailov T.A., Evdulov D.V., Evdulov O.V. Systems for heat removal from electronic equipment elements based on melting heat accumulators. *Herald of the Dagestan State Technical University. Technical sciences*. 2015;1 (36):38-44. (In Russ)
12. Goldsmid H.J. Thermoelectric refrigeration, New York: Springer, 2013. 240 p.
13. Vasiliev E.N. Calculation and optimization of heat exchangers of a thermoelectric cooling unit. *Thermal physics and aeromechanics*. 2022;29(3): 419-430. (In Russ)
14. Theory of heat and mass transfer / Ed. A.I. Leontiev. - Moscow: Bauman Moscow State Technical University, 2018; 464. (In Russ)
15. <http://www.kryotherm.ru> (access date 09/15/2024).

Сведения об авторах:

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

Микаилов Мурад Ильгамович, аспирант кафедры теоретической и общей электротехники; zcodor@yandex.ru.

Магомедов Рамазан Магомедович, старший преподаватель кафедры информационной безопасности; indiansbobi@gmail.com.

Information about authors:

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

Murad I. Mikailov, Postgraduate student, Department of Theoretical and General Electrical Engineering; zcodor@yandex.ru.

Ramazan M. Magomedov, Senior lecturer, Department of Information Security; indiansbobi@gmail.com.

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 02.09.2024.

Одобрена после/рецензирования Revised 17.10.2024.

Принята в печать/ Accepted for publication 17.10.2024.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 004.89



DOI: 10.21822/2073-6185-2024-51-4-23-32

Оригинальная статья/ Original article

**Аналитическая оценка методов обнаружения мошенничества
с банковскими картами: обучение с учителем, без учителя и с подкреплением**

Абдурахман Джамал Джама

Финансовый университет при Правительстве РФ,
125167, Москва, пр-кт Ленинградский, д. 49/2, Россия

Резюме. Цель. Мошенничество с банковскими картами становится все более серьезной проблемой для частных лиц, предприятий и финансовых учреждений. Возникает необходимость в применении эффективных мер по обнаружению мошенничества для защиты потребителей и бизнеса от финансовых потерь. **Метод.** Применен теоретико-информационный анализ методов обнаружения мошенничества с банковскими картами и определен потенциал алгоритмов машинного обучения в повышении точности обнаружения мошенничества. **Результат.** Дана аналитическая оценка методов обнаружения мошенничества, охватывающая различные подходы к обучению, включая методы контролируемого, неконтролируемого обучения и обучения с подкреплением. **Вывод.** Выбор метода обнаружения мошенничества должен основываться на всестороннем понимании доступных данных, конкретных требований в области применения и компромисса между различными методами с точки зрения производительности, адаптируемости и вычислительной сложности.

Ключевые слова: мошенничество, банковские карты, машинное обучение, обучение с учителем, без учителя, с подкреплением, несбалансированный набор данных

Для цитирования: Абдурахман Джамал Джама. Аналитическая оценка методов обнаружения мошенничества с банковскими картами: обучение с учителем, без учителя и с подкреплением. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2024; 51(4):23-32. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-4-23-32

**An analytical assessment of credit card fraud detection techniques:
Supervised, Unsupervised, and Reinforcement Learning**
Abdourahman Djamel Djama

Financial University under the Government of the Russian Federation,
49/2 Leningradsky Ave., Moscow 125167, Russia

Abstract. Objective. Bank card fraud is an increasingly serious problem for individuals, businesses and financial institutions. There is a need for effective fraud detection measures to protect consumers and businesses from financial losses. **Method.** information-theoretical analysis of methods for detecting fraud with bank cards, machine learning algorithms in improving the accuracy of fraud detection. **Result.** An analytical evaluation of fraud detection methods is provided, covering different learning approaches: supervised, unsupervised and reinforcement learning. **Conclusion.** The choice of a fraud detection method should be based on an understanding of the available data, the specific requirements of the application domain and the trade-offs between methods in terms of performance, adaptability and computational complexity.

Keywords: fraud, bank cards, machine learning, supervised learning, unsupervised learning, reinforcement learning, imbalanced dataset

For citation: Abdourahman Djamel Djama. An analytical assessment of credit card fraud detection techniques: Supervised, Unsupervised, and Reinforcement Learning. Herald of the Da-

ghestan State Technical University. Technical Sciences. 2024; 51(4):23-32. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-4-23-32

Введение. Мошенничество с банковскими картами по-прежнему представляет собой серьезную проблему для финансовых учреждений, вызывая значительные финансовые потери подрывая доверие потребителей. С развитием цифровых транзакций потребность в надежных системах обнаружения мошенничества стала более острой, чем когда-либо. Традиционные методы часто не справляются с обнаружением сложных моделей мошенничества, что требует изучения передовых методов машинного обучения.

Постановка задачи. В статье представлена аналитическая оценка методов обнаружения мошенничества с банковскими картами с упором на контролируемые, неконтролируемые подходы и подходы к обучению с подкреплением. Обучение с учителем использует размеченные данные для обучения моделей прогнозированию мошеннических транзакций, тогда как обучение без учителя выявляет аномалии в данных транзакций без предварительной маркировки.

С другой стороны, обучение с подкреплением динамически изучает оптимальные стратегии обнаружения посредством непрерывной обратной связи. Оценивая эти методы, мы стремимся понять их сильные стороны, ограничения и практическое применение для повышения точности и эффективности обнаружения мошенничества. Сравнительный анализ предоставит ценную информацию для разработки более эффективных систем обнаружения мошенничества, что в конечном итоге защитит финансовые транзакции в эпоху цифровых технологий.

Методы исследования. 1. Контролируемые методы обучения. Supervised learning (Обучение с учителем) - это тип парадигмы машинного обучения, в которой алгоритм обучается на помеченном наборе данных. Это означает, что каждый вход в обучающих данных связан с соответствующим выходом или целью. Цель обучения с учителем - изучить сопоставление или функцию входных данных с выходными данными, чтобы при представлении новых, невидимых входных данных алгоритм мог делать точные прогнозы или классификации [2].

1.1. Машина опорных векторов (Support Vector Machine). Машины опорных векторов (SVM) стали известным алгоритмом машинного обучения для обнаружения мошенничества с банковскими картами. В качестве метода контролируемого обучения SVM способен классифицировать данные на две категории: мошеннические и немошеннические транзакции на основе функций, извлеченных из данных транзакций. Алгоритм учится распознавать закономерности и особенности данных, которые отличают мошеннические транзакции от законных [6].

Одна из ключевых сильных сторон SVM заключается в их способности идентифицировать нелинейные границы принятия решений путем преобразования данных с помощью нелинейной функции ϕ в многомерное пространство.

Это преобразование позволяет разделять точки данных, которые не могут быть разделены прямой линией в исходном пространстве, путем создания линейной гиперплоскости в пространстве признаков F , эффективно разделяя точки разных классов. Впоследствии гиперплоскость проецируется обратно в исходное пространство I , принимая вид нелинейной кривой.

Математически, учитывая n выборку обучающих данных:

$$\{(x_i, y_i)\}_{i=1}^n, \quad x_i \in R^N, y_i \in \{-1, 1\} \quad (1)$$

SVM формулируется следующей оптимизационной задачей:

$$\text{Minimize } \Phi(w) = \frac{1}{2}w^T w + C \sum_{i=1}^n \xi_i \quad (2)$$

При условии

$$\begin{aligned} y_i(\langle w, \phi(x_i) \rangle + b) &\geq 1 - \xi_i, \quad i = 1, \dots, n \\ \xi_i &\geq 0, \quad i = 1, \dots, n \end{aligned} \quad (3)$$

Где, функция ядра ϕ отображает точки обучения x_i из входного пространства в пространство признаков более высокой размерности. Параметр регуляризации C контролирует компромисс между достижением низкой ошибки в обучающих данных и минимизацией нормы весов. Преимуществом использования SVM является его способность обрабатывать многомерные данные и нелинейные связи между функциями, что может повысить эффективность обнаружения мошенничества с банковскими картами.

1.2. Случайный лес (Random Forest) является алгоритмом машинного обучения, применяемым для задач классификации и регрессионного анализа. Этот метод широко применяется в задачах выявления мошенничества с использованием банковских карт. Его преимущество заключается в способности обрабатывать обширные наборы данных с многомерными характеристиками.

Для обнаружения мошенничества с банковскими картами модель Random Forest обучается на наборе данных транзакций, где каждая операция помечена как мошенническая или легитимная [3]. Алгоритм формирует несколько деревьев решений, каждое из которых обучается на случайной выборке данных и случайном наборе признаков.

Деревья принимают коллективное решение по предсказанию статуса новой транзакции как мошеннической или нет. Random Forest демонстрирует эффективность в задаче обнаружения мошенничества с банковскими картами за счет способности обрабатывать дисбалансированные данные, где количество мошеннических операций значительно меньше числа легитимных транзакций.

Кроме того, этот метод позволяет выявить наиболее значимые признаки, способствующие обнаружению мошенничества. Также Random Forest способен обрабатывать отсутствующие значения и выбросы, часто встречающиеся в данных по банковским картам. В контексте классификации классификатор случайного леса m получается большинством голосов среди K деревьев классификации с входом x и Θ - набор параметров, т.е:

$$m(x : \Theta_1, \dots, \Theta_K) = \begin{cases} 1 & \text{if } \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K m(x; \Theta_j) > \frac{1}{2} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

2. Неконтролируемые методы обучения. Обучение без учителя (Unsupervised learning) - это разновидность машинного обучения, которая занимается анализом и кластеризацией немаркированных данных. В отличие от обучения с учителем, которое связано с помеченными наборами данных для обучения моделей прогнозированию результатов, обучение без учителя работает с данными, которые не имеют помеченных ответов. Основная цель - найти основную структуру или распределение данных, что позволит обнаружить закономерности и идеи без необходимости вмешательства человека [2].

2.1. Ограниченная машина Больцмана (Restricted Boltzmann Machine).

Ограниченная машина Больцмана (RBM) - это тип алгоритма глубокого обучения, который можно использовать для обнаружения мошенничества с банковскими картами. RBM является генеративная модель, которая изучает распределение вероятностей входных данных и может использоваться для обнаружения аномалий в данных.

При обнаружении мошенничества с банковскими картами RBM можно обучить на большом наборе данных о транзакциях по банковскими картам, чтобы изучить нормальные модели поведения для законных транзакций. Как только RBM изучит эти шаблоны, его можно использовать для выявления аномалий в новых транзакциях, которые не соответствуют нормальному шаблону. Эти аномалии могут свидетельствовать о мошеннической деятельности.

Модель RBM состоит из видимых и скрытых слоев, которые связаны симметричными весами. Входы x соответствуют нейронам в видимом слое. Реакция нейронов h в скрытом слое моделирует распределение вероятностей входных данных. Распределение вероятностей получается путем изучения симметричных связующих весов между видимыми и скрытыми слоями. Нейроны в одном слое не связаны.

$P(h|x)$ - Условная вероятность конфигурации скрытых нейронов (h) при заданной конфигурации видимых нейронов, связанных с входами (x), равна:

$$p(h|x) = \prod_i p(h_i|x) \quad (5)$$

Генеративное обучение в RBM используется для итеративного изучения неизвестного (h) с использованием входных данных (x). Фаза генеративного обучения повторяется до тех пор, пока реконструированные образцы не будут максимально приближены к x .

Кроме того, RBM используется для предварительной обработки данных и извлечения соответствующих функций, которые затем можно использовать в другом алгоритме машинного обучения, таком как дерево решений или нейронная сеть.

2.2. Автоэнкодер (Auto-Encoder) представляет собой вид нейронной сети, который применяется для обнаружения мошенничества с использованием банковских карт. Суть использования автоэнкодеров заключается в выявлении аномалий в данных [10]. Эти модели обучаются восстанавливать входные данные, и любое отклонение от ожидаемого результата рассматривается как аномалия. АЕ определяется по следующей формуле:

$$\hat{X} = D(E(X)) \quad (6)$$

Где, X - входные данные, D - карта декодирования, E - карта кодирования, а \hat{X} - реконструированные входные данные. Задача автоэнкодера - максимально точно аппроксимировать распределение X .

Для обнаружения мошенничества с банковскими картами часто применяются автоэнкодеры. В качестве входных данных для автоэнкодера выступают информация о транзакциях, такая как сумма транзакции, местоположение, время и другие. Автоэнкодер обучается восстанавливать эту информацию, и любое отклонение от ожидаемого вывода идентифицируется как потенциальное мошенничество [17].

Кроме того, автоэнкодеры могут быть использованы и в режиме обучения без учителя. В таких случаях модель обучается на наборе данных, в котором отсутствуют мошеннические транзакции. После завершения обучения автоэнкодера, он может применяться для обнаружения любых новых транзакций, которые не соответствуют изученному распределению.

3. Обучение с подкреплением (Reinforcement learning) - это тип машинного обучения, при котором агент учится принимать решения, взаимодействуя с окружающей средой и получая обратную связь (feedback) в виде вознаграждений или наказаний в зависимости от своих действий. Этот итерационный процесс включает в себя метод проб и ошибок (trial-and-error approach), при котором стратегия агента со временем уточняется за счет максимизации совокупного вознаграждения [16]. Ключевые компоненты обучения с подкреплением включают агента, среду, действия, состояния и вознаграждения.

3.1. Алгоритм глубокой Q-сети (Deep Q Network (DQN)). Одним из таких алгоритмов обучения с подкреплением является Deep Q-Network (DQN), который сочетает в себе глубокие нейронные сети (DNN) и Q-learning для решения сложных задач принятия решений.

Q-learning - это метод обучения вне политики, целью которого является изучение оптимальной политики для агента путем оценки Q-value. Q-value пары состояние-действие (s, a), обозначаемое как $Q(s, a)$, представляет собой ожидаемую совокупную будущую награду за выполнение действия «a» в состоянии «s» и последующее следование

оптимальной политике. Глубокая нейронная сеть используется для аппроксимации функции Q-значения, обозначаемой как $Q(s, a; \theta)$, где θ представляет параметры сети.

Входными данными для сети является состояние «s», и она выводит значения Q для всех возможных действий. Сеть обучена минимизировать разницу между прогнозируемыми значениями Q и целевыми значениями Q, которые рассчитываются с использованием уравнения Беллмана и вознаграждений, полученных от окружающей среды [8].

Deep Q Network (DQN) можно применить для обнаружения мошенничества с банковскими картами, определив проблему обнаружения мошенничества как задачу обучения с подкреплением. Пространство состояний (*state*) \mathcal{S} включает в себя характеристики транзакций по банковским картам, обозначаемые как s , такие как сумма, продавец, время, и т.д.

Пространство действий (*action*) \mathcal{A} состоит из возможных действий, которые агент может предпринять для каждой транзакции, например одобрение, отклонение или отмена. Q-функция, $Q(s, a)$, оценивает ожидаемое совокупное вознаграждение за выполнение действия a в состоянии s .

Цель DQN - изучить оптимальную Q-функцию, которая максимизирует совокупное вознаграждение с течением времени.

$$Q(s, a) = E \left[\sum_{t=0}^{\infty} \gamma^t r_t \mid s_0 = s, a_0 = a \right] \quad (7)$$

Где, r_t - награда на временном шаге «t»; γ - это коэффициент дисконтирования, который придает большее значение немедленному вознаграждению, чем будущему вознаграждению. В процессе обучения, DQN минимизирует TDE (Temporal Difference Error), δ , определяемую формулой:

$$\delta = (r + \gamma \max_{a'} Q(s', a') - Q(s, a)) \quad (8)$$

Здесь, r - непосредственное вознаграждение, γ - коэффициент дисконтирования, s' - следующее состояние, a' - следующее действие. DQN учится на прошлом опыте, используя воспроизведение опыта, сохранение и случайную выборку переходов (s, a, r, s') .

Веса Q-сети обновляются, чтобы минимизировать MSTDE (mean squared temporal difference error). Deep Q Network оценивает Q-value для текущего состояния транзакции s и выбирает действие с самым высоким Q-value или следует стохастической политике, основанной на Q-values.

Непрерывное обучение облегчается за счет периодического обновления DQN новыми данными о транзакциях, что обеспечивает адаптируемость к развивающимся моделям мошенничества. В целом, платформа DQN предлагает Data-driven и динамический подход к обнаружению мошенничества с банковскими картами, используя принципы обучения с подкреплением [19].

Обсуждение результатов. Набор данных и предварительная обработка. Этот набор данных содержит транзакции по банковскими картам, совершенные в сентябре 2019 года держателями карт. Транзакции, включают 570 записи о мошенничестве из 300 807 транзакций.

Набор данных сильно несбалансирован, и мошеннический класс составляет 0,17% всех транзакций. Из-за проблемы конфиденциальности, набор данных содержит входные переменные, которые получены из преобразования PCA. Для нечисловых характеристик «Время» и «Сумма» мы нормализуем их с помощью RobustScaler, который масштабирует данные в соответствии с диапазоном квантилей.

Специально для моделей обучения с учителем, чтобы решить проблему сильной несбалансированности, используется Random Downsampling, чтобы избежать смещения результатов в сторону немошеннического класса. В результате Random Downsampling, немошеннические транзакции случайным образом сокращаются до той же суммы, что и мошеннические транзакции.

Метрики оценки. В зависимости от цели эксперимента, который мы проводим, мы можем использовать различные статистические показатели для оценки бинарных классификаций.

Accuracy (точность) является широко используемым показателем в машинном обучении, но она может быть не самым подходящим показателем для обнаружения мошенничества с банковскими картами, особенно при работе с несбалансированными наборами данных, где количество немошеннических транзакций значительно превышает количество мошеннических транзакций. В таких случаях точность может вводить в заблуждение, поскольку модель может достичь высокой точности, просто предсказывая класс большинства (без мошенничества) без эффективного выявления мошеннических транзакций.

В данной статье рассматриваем Accuracy наряду с другим показателем, таким как площадь под кривой ROC (AUC-ROC), чтобы обеспечить более полную оценку эффективности модели, особенно в контексте обнаружения мошенничества с банковскими картами.

Accuracy (точность) - показывает, сколько правильных предсказаний сделала модель относительно общего числа предсказаний.

$$\text{Accuracy} = \frac{\text{Number of Correct Predictions}}{\text{Total Number of Predictions}} \quad (9)$$

F1-Score - это показатель, который уравнивает Precision и Recall, что делает его особенно полезным в ситуациях, когда существует дисбаланс между классами, как это часто бывает при обнаружении мошенничества с банковскими картами. F1-score - это гармоническое среднее значения точности и полноты, предоставляющее единое значение, учитывающее как ложноположительные, так и ложноотрицательные результаты. Формула расчета F1-Score выглядит следующим образом:

$$\text{F1 Score} = \frac{TP}{TP + \frac{1}{2}(FP + FN)} \quad (10)$$

Площадь под кривой операционной характеристики приемника (AUC-ROC) объединяет уровень ложных срабатываний (FPR) и уровень истинного положительного результата (TPR) в единый показатель, рассматривая класс мошенничества как «положительный», а класс отсутствия мошенничества как «отрицательный». $TPR = TP/P$ и $FPR = FP/N$, где P и N обозначают количество образцов положительного и отрицательного классов соответственно.

TP (истинно положительный) - это количество корректно предсказанных положительных образцов, а FP (ложно положительный) - количество неверно предсказанных положительных образцов. AUC-ROC оценивает производительность модели при различных пороговых значениях принятия решений, поэтому он очень полезен в случае несбалансированных наборов данных, так как он.

Это помогает найти оптимальный баланс между ложноположительными и ложноотрицательными результатами, учитывая особенности системы обнаружения мошенничества с банковскими картами.

Для оценки эффективности обнаружения мошеннических транзакций был использован метод k -кратной кросс-валидации для предотвращения переобучения. Процесс включает разделение набора данных на k равных частей или сгибов.

Одна часть используется как тестовый набор данных, а остальные ($k-1$) части - для обучения модели. Этот процесс повторяется k раз, каждый раз используя один из частей в качестве тестового набора данных. Затем результаты k итераций усредняются для получения оценки производительности модели. Кросс-валидация k -Fold обеспечивает

более точную оценку производительности модели на независимых данных, тестируя модель на нескольких подмножествах данных.

В табл. 1 представлены результаты проведенного сравнительного анализа методов обнаружения мошенничества с банковскими картами в различных парадигмах машинного обучения: обучение с учителем (SVM, RF), обучение без учителя (RBM, AE) и обучение с подкреплением (DQN).

Таблица 1. Результаты проведенного сравнительного анализа методов обнаружения мошенничества

Table 1. Results of the comparative analysis of fraud detection methods

Learning Algorithms	Accuracy	F1-Score	AUC-ROC
Support vector machine (SVM)	0.983	0.911	0.979
Random Forest (RF)	0.992	0.957	0.987
Restricted Boltzmann Machine (RBM)	0.978	0.881	0.952
Auto-Encoder (AE)	0.987	0.934	0.936
Deep Q Network (DQN)	0.978	0.926	0.965

Метрики оценки включают Accuracy, показатель F1-score и площадь под кривой рабочей характеристики приемника (AUC-ROC).

Для контролируемого обучения мы использовали модели случайного леса и машины опорных векторов (SVM). Модель Random Forest превзошла другие с точностью 99,26%, показателем F1-score 95,70% и AUC-ROC 98,75%. Модель SVM достигла точности 98,3%, показателя F1-score 91,06% и AUC-ROC 97,9%. Эти результаты показывают, что модели контролируемого обучения, особенно случайный лес, очень эффективны в обнаружении мошенничества с банковскими картами.

Модели обучения без учителя, включая кластеризацию. Ограниченная машина Больцмана (Restricted Boltzmann Machine (RBM)) и Автоэнкодер (Auto-Encoder), показали более низкую производительность по сравнению с моделями с учителем. Модель кластеризации RBM имела точность 97,82%, показатель F1-score 88,05% и AUC-ROC 95,25%. Модель Автоэнкодер показала лучшие результаты: точность 98,70%, показатель F1-score 93,42% и AUC-ROC 88,30%.

Хотя эти модели полезны в сценариях, в которых отсутствуют размеченные данные, их более высокий уровень ложных срабатываний подчеркивает необходимость дальнейшего совершенствования, чтобы стать жизнеспособной альтернативой контролируемому обучению. Обучение с подкреплением было представлено моделью Deep Q-Network (DQN), которая дала многообещающие результаты. Модель DQN зафиксировала точность 97,85%, показатель F1 92,66% и AUC-ROC 96,55%. Хотя его производительность была немного ниже, чем у наиболее эффективных контролируемых моделей, она значительно превосходила неконтролируемые модели.

Подход с подкреплением обучения демонстрирует потенциал адаптации в динамичной среде, где модели мошенничества постоянно развиваются. Изучение различных методов обнаружения мошенничества с банковскими картами в рамках контролируемых, неконтролируемых моделей обучения и моделей обучения с подкреплением обеспечивает полное понимание их сильных и слабых сторон. Модели контролируемого обучения продемонстрировали исключительную производительность, особенно при работе с хорошо размеченными данными, что подчеркивает их эффективность в таких сценариях.

Высокая точность, показатель F1 и значения AUC-ROC, достигнутые с помощью этих моделей, указывают на их способность обнаруживать мошенничество при наличии достаточного количества размеченных данных. Среди методов контролируемого обучения выдающейся моделью стал случайный лес, способный выявлять сложные закономерности и взаимодействия в данных транзакций, а машины опорных векторов (SVM) также продемонстрировали похвальную производительность.

Напротив, модели обучения без учителя, такие как ограниченные машины Больцмана и кластеризация с автоматическим кодированием, показали многообещающие результаты, хотя и немного ниже, чем их контролируемые аналоги. Их более низкие показатели производительности могут указывать на более высокий уровень ложных срабатываний, что потенциально может повлиять на их эффективность в определенных сценариях. Однако преимущество обучения без учителя заключается в его применимости в ситуациях, когда маркированные данные недостаточны или недоступны, что является распространенной проблемой на ранних стадиях обнаружения мошенничества, когда маркированных примеров недостаточно. Несмотря на общую более низкую эффективность, эти модели по-прежнему могут играть решающую роль в первоначальном обнаружении и понимании новых типов мошенничества.

Методы обучения с подкреплением, такие как модель Deep Q-Network (DQN), представляют собой многообещающий альтернативный подход. Исследование показало, что, хотя эта модель не превосходит лучшие модели обучения с учителем, она заметно превосходит методы без учителя.

Гибкость моделей обучения с подкреплением делает их особенно ценными в динамичных средах, где тактика мошенничества постоянно развивается. Способность обучения с подкреплением изучать и оптимизировать стратегии посредством взаимодействия с окружающей средой делает его универсальным инструментом в борьбе с мошенничеством с банковскими картами.

Вывод. Одним из ключевых выводов этого исследования является потенциал гибридного подхода. Объединив сильные стороны методов контролируемого, неконтролируемого обучения и обучения с подкреплением, можно создать более надежную и сложную систему обнаружения мошенничества.

Например, модели обучения с учителем можно использовать для точного обнаружения на основе помеченных данных, а модели без учителя можно применять для обнаружения аномалий при отсутствии меток. Обучение с подкреплением, в свою очередь, может динамически совершенствовать стратегии обнаружения на основе обратной связи от меняющейся среды мошенничества.

Выбор подходящего метода обнаружения мошенничества с банковскими картами зависит от различных факторов, включая доступность маркированных данных, необходимость обнаружения в режиме реального времени и способность адаптироваться к развивающимся моделям мошенничества.

Методы обучения с учителем оказываются эффективными, когда доступны высококачественные размеченные данные, в то время как подходы к обучению без учителя выгодны для выявления ранее неизвестных моделей мошенничества. Хотя обучение с подкреплением менее изучено, оно открывает возможности для разработки динамических и адаптивных стратегий обнаружения мошенничества. Исследователи и практики могут рассмотреть возможность интеграции нескольких методов, чтобы использовать свои сильные стороны и смягчить их ограничения.

Будущие исследования могут быть сосредоточены на разработке передовых гибридных или ансамблевых подходов, которые сочетают в себе различные методы, тем самым повышая точность и эффективность методов обнаружения мошенничества с банковскими картами.

Такие комплексные подходы потенциально способны решить многогранные проблемы, возникающие в результате мошеннической деятельности в финансовой сфере.

В конечном счете, выбор метода обнаружения мошенничества должен основываться на всестороннем понимании доступных данных, конкретных требований области применения и компромисса между различными методами с точки зрения производительности, адаптивности и вычислительной сложности.

Библиографический список:

1. Бхаттачарья С., Джха С., Таракуннель К., и Westland, J.C. 2017. Интеллектуальный анализ данных для мошенничества с банковскими картами: сравнительное исследование. Системы поддержки принятия решений 50 (3): 602–613.
2. Болтон Р. Дж, Рука DJ, и другие. 2021. Неконтролируемые методы профилирования для обнаружения мошенничества. банковскими скоринг и кредитный контроль VII 235–255.
3. Брейман Л. 2001. Случайные леса. Машинное обучение 45(1):5–32.
4. Контролируемое и неконтролируемое обучение. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ibm.com/think/topics/supervised-vs-unsupervised-learning>
5. Чан П.К., Фан В., Продромидис А.Л. и Столфо С. Дж. 2019. Распределенный анализ данных при обнаружении мошенничества с банковскими картами. Интеллектуальные системы IEEE и их приложения 14 (6): 67–74.
6. Кортес К., Вапник В. 2015. Сети опорных векторов. Машинное обучение 20(3):273–297.
7. Даль Поццоло А., Бораки Г., Кэлен О. Алиппи К. и Бонтемпи Г. 2018. Обнаружение мошенничества с банковскими картами: реалистичное моделирование и новая стратегия обучения. Транзакции IEEE в нейронных сетях и системах обучения 29(8).
8. Обучением с подкреплением. [Электр. ресурс]. URL: <https://habr.com/ru/articles/437020/>
9. Дэн Л., Зельцер М.Л., Ю, Д. ; Асеро А., Мохамед А.-Р. и Хинтон Г. 2020. Двоичное кодирование речевых спектрограмм с использованием глубокого автокодировщика. На одиннадцатой ежегодной конференции Международной ассоциации речевой коммуникации.
10. Камаль Б., Фатеме Д. Автоэнкодеры и их применение в машинном обучении: обзор. Обзор искусственного интеллекта. 2024, Т. 57, 28 <https://link.springer.com/article/10.1007/s10462-023-10662-6>
11. Дорроноро Дж. Р., Джинель Ф. Санчес С.Р., и Санта-Крус, К. 2016. Нейронное обнаружение мошенничества при операциях с банковскими картами. Транзакции IEEE в нейронных сетях.
12. Фиоре У. Де Сантис А. Перла Ф., Дзанетти П. и Палмиери Ф. 2018. Использование генеративных состязательных сетей для повышения эффективности классификации при обнаружении мошенничества с банковскими картами. Информационные науки.
13. Метод опорных векторов SVM. [Электр. ресурс]. <https://scikit-learn.ru/1-4-support-vector-machines/>
14. Гудфеллоу И., Пуже-Абади, Дж., Мирза М., Сюй, Б. Уорд-Фарли Д., Озаир, С. Курвиль А., и Bengio, Y. 2021. Генеративные состязательные сети. В достижениях в области нейронных систем обработки информации, 2672–2680.
15. Кривко М. 2016. Гибридная модель для систем обнаружения мошенничества с пластиковыми картами. Экспертные системы с приложениями 37(8):6070–6076.
16. Мид, Адриан и Льюрис, Тайлер и др. 2018 г., Обнаружение мошенничества в состязательной среде: подход к обучению с подкреплением. Симпозиум по проектированию систем и информационной инженерии (SIEDS) 2018 года.
17. Пумсирират А., Ян Л. 2019. Обнаружение мошенничества с банковскими картами с использованием глубокого обучения на основе автоматического кодировщика и ограниченной машины Больцмана. Международный журнал передовых компьютерных наук и приложений 9 (1).
18. Цзяньцин Ф., Чжаоран В., Юйчэнь С., Чжуоран., 2020. Теоретический анализ глубокого Q-обучения. 2-й конференции по обучению динамике и управлению, PMLR 120: 486–489, 2020. URL: <https://proceedings.mlr.press/v120/yang20a.html>
19. <https://medium.com/@cedric.vandelaer/reinforcement-learning-dqn-part-1-2-aac5f1e6e3be> Обучение с подкреплением: DQN. [Электронный ресурс].
20. А.К.Бансен, Д.Ауада, А.Стоянович, Б.Оттерстен. Стратегии разработки функций для обнаружения мошенничества с кредитными картами, Expert Systems with Applications, 2016, Т.51, №1, с.134–142.

References:

1. Bhattacharya, S.; Jha, S.; Tarakunnel, K.; and Westland, J.C. Data mining for bank card fraud: A comparative study. *Decision Support Systems* 2017; 50(3):602–613.
2. Bolton, R. J.; Hand, D. J.; et al. 2021. Unsupervised profiling techniques for fraud detection. *Bank Scoring and Credit Control* VII 235–255.
3. Breiman, L. Random forests. *Machine Learning* 2001;45(1):5–32.
4. Supervised and Unsupervised Learning. [El resource]. <https://www.ibm.com/think/topics/supervised-vs-unsupervised-learning>
5. Chan, P. K.; Fan, W. ; Prodromidis, A. L.; and Stolfo, S. J. Distributed data mining in bank card fraud detection. *IEEE Intelligent Systems and Applications* 2019; 14(6):67–74.
6. Cortes, C., and Vapnik, V. Support Vector Networks. *Machine Learning*. 2015; 20(3):273–297.

7. Dal Pozzolo A.; Boracchi G. Kalen O.; Alippi C. Bontempi G. Bank Card Fraud Detection: Realistic Modeling and a New Training Strategy. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems* 2018; 29(8).
8. Reinforcement Learning. [Electronic resource]. URL: <https://habr.com/ru/articles/437020/>
9. Deng L.; Seltzer M.L.; Yu D.; Acero A.; Mohamed A.-r., Hinton G. 2020. Binary encoding of speech spectrograms using a deep autoencoder. In Eleventh Annual Conference of the International Speech Communication Association.
10. Kamal B., Fatemeh D. Autoencoders and their applications in machine learning: A review. *Artificial Intelligence Review*, 2024;57, 28 URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10462-023-10662-6>
11. Dorransoro, J. R.; Ginelle, F.; Sanchez, C. R.; and Santa Cruz, C. 2016. Neural fraud detection in bank card transactions. *IEEE Transactions on Neural Networks*.
12. Fiore, U.; De Santis, A.; Perla, F.; Zanetti, P.; and Palmieri, F. 2018. Using Generative Adversarial Networks to Improve Classification Performance in Bank Card Fraud Detection. *Information Sciences*.
13. Support Vector Machines (SVM). [El. resource]. URL: <https://scikit-learn.ru/1-4-support-vector-machines/>
14. Goodfellow I.; Pouget-Abadie J.; Mirza M.; Xu B. Ward-Farley, D.; Ozair, S; Courville A; Bengio, Y. 2021 Generative Adversarial Networks. In *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2672–2680.
15. Krivko, M. 2016. A Hybrid Model for Plastic Card Fraud Detection Systems. *Expert Systems with Applications* 37(8):6070–6076. (In Ross)
16. Mead Adrian and Lewis, Tyler et al. 2018. “Fraud Detection in Adversarial Environments: A Reinforcement Learning Approach.” 2018. Systems and Information Engineering Design Symposium (SIEDS).
17. Phumsirirat A., Yang L. Bank Card Fraud Detection Using Deep Learning Based on Autoencoder and Restricted Boltzmann Machine. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications* 2019; 9(1).
18. Jianqing, F., Zhaoran, W., Yuchen, S., Zhuoran, J., A Theoretical Analysis of Deep Q-Learning. 2nd Conference on Dynamics and Control Learning, *PMLR*. 2020;120:486–489. <https://proceedings.mlr.press/v120/yang20a.html>
19. Reinforcement Learning: DQN. [El. resource]. <https://medium.com/@cedric.vandelaer/reinforcement-learning-dqn-part-1-2-aac5f1e6e3be>
20. A.K. Bahnsen, D. Aouada, A. Stojanovic, and B. Ottersten. Feature Engineering Strategies for Credit Card Fraud Detection., *Expert Systems with Applications*, 2016; 51 (1):134–142,

Сведения об авторе:

Абдурахман Джамал Джама, аспирант, кафедра «Информационная безопасность»,
jamaljolevas14psg@gmail.com

Information about author:

Abdurahman Jamal Jama, Graduate, Department of Information Security, jamaljolevas14psg@gmail.com

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 02.09.2024.

Одобрена после рецензирования Revised 17.10.2024.

Принята в печать/ Accepted for publication 17.10.2024.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 004.45



DOI: 10.21822/2073-6185-2024-51-4-33-39

Обзорная статья/ Review article

**Анализ существующих математических моделей оценивания компетенций студентов
высшего образования**

Ю.А. Бычковская¹, В.С. Бычковский²

¹Байкальский государственный университет,

¹664025, г. Иркутск, ул. Ленина 11, Россия,

²Иркутский государственный транспортный университет,

²664074, Иркутск, ул. Чернышевского, 15, Россия

Резюме. Цель. Цель работы состоит в определении основных особенностей существующих математических моделей для выполнения компетентностного подхода оценивания. Необходимо выявить, какие именно параметры целесообразно использовать в математической модели, методику их определения, а также на каком этапе формируется итоговая оценка компетенций. **Метод.** Исследование основано на проведении теоретико-информационного анализа существующих математических моделей оценивания компетенций. **Результат.** Разработка математической модели оценки компетенций требует учета различных факторов, включая трудоемкость учебной дисциплины, посещаемость занятий, участие в олимпиадах, конференциях и т.д. Установлено, что оценка компетенции не всегда зависит только от одной области знаний, а является междисциплинарной и включает не только знания, умения и навыки, но также учитывает влияние социальной, информационной и интеллектуальной среды. Исследование показало перспективность применения теории латентных переменных. **Вывод.** Проведенный научный обзор позволяет разработать новую математическую модель для компетентностного подхода освоения учебной программы, которая будет учитывать параметры, не рассмотренные в других математических моделях, а также использование теории латентных переменных. Для модернизации компетентностного подхода необходим сбор информации из соответствующей базы данных о внеучебной деятельности обучающегося, которая оказывает влияние на итоговый результат оценивания. Итогом оценивания компетенций будет карта компетенций, формируемая в течение семестра или курса.

Ключевые слова: компетентностный подход, математическая модель оценивания, карта компетенций, теория латентных переменных, обучение, автоматизированная система оценивания

Для цитирования: Ю.А. Бычковская, В.С. Бычковский. Анализ существующих математических моделей оценивания компетенций студентов высшего образования. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2024; 51(4):33-39. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-4-33-39.

**Analysis of existing mathematical models for assessing the competencies of higher
education students**

J.A. Bychkovskaya¹, V.S. Bychkovsky²

¹ Baikal State University,

¹11 Lenin St., Irkutsk 664025, Russia,

²Irkutsk State Transport University,

²664074, Irkutsk, St. Chernishevskiy 15, Russia

Abstract. Objective. The purpose of the work is to determine the features of mathematical models for implementing the competence-based assessment approach. It is necessary to iden-

tify which parameters are appropriate to use in the mathematical model, the methodology for their determination, and at what stage the final assessment of competencies is formed. **Method.** The study is based on the theoretical and information analysis of mathematical models for assessing competencies. **Result.** The development of a mathematical model for assessing competencies requires taking into account factors, including the labor intensity of the academic discipline, class attendance, participation in Olympiads, conferences, etc. It has been established that competence assessment does not always depend on only one area of knowledge, but is interdisciplinary and includes not only knowledge, abilities and skills, but takes into account the influence of the social, information and intellectual environment. The study showed the prospects of applying the theory of latent variables. **Conclusion.** The scientific review allows developing a new mathematical model for the competence-based approach to mastering the curriculum. To modernize the competence-based approach, it is necessary to collect information on the extracurricular activities of the student. The result of the competency assessment will be a competency map, formed during the semester or course.

Keywords: competence approach, mathematical model of assessment, competence map, item response theory, education, automated assessment system

For citation: J.A. Bychkovskaya, V.S. Bychkovsky. Analysis of existing mathematical models for assessing the competencies of higher education students. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2024; 51(4):33-39 DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-4-33-39

Введение. Для повышения эффективности обучения студентов в вузах разрабатываются различные подходы для оценивания их уровня усвоения учебной программы. Наиболее известными подходами определения компетенции обучающегося по дисциплине или курсу являются квалификационный и компетентностный. На данный момент компетентностный подход является более совершенным по сравнению с другим, так как учитывает не только знания, умения и навыки, а также психологические, социальные и др. особенности личности [1].

В современном мире для осуществления компетентностного оценивания разрабатывается программное обеспечение, которое позволяет хранить и обрабатывать различные данные, касающиеся успеваемости каждого обучающегося в течение учебного процесса. По окончании учебного процесса программное обеспечение позволяет определить итоговый результат успеваемости и произвести оценку компетенции обучающегося. Также преимуществом программного обеспечения является интуитивно понятный интерфейс, который не требует профильных знаний от пользователя.

Основой программного обеспечения является алгоритм, который включает в себя математическую модель, которая учитывает различные параметры (например, текущая оценка по предмету, посещаемость и т.д.). С помощью математической модели возможно выполнить расчет оценки компетенции в области освоенной учебной программы обучающимся [1].

Постановка задачи. Для совершенствования компетентностного подхода необходимо определить, на чем будет основываться его математическая модель. Исходя из этого возникает цель - выполнить научный обзор и провести анализ существующих математических моделей оценивания компетенций.

Достижение цели позволит выявить какие именно параметры необходимо использовать в математической модели и как именно их определять, а также на каком этапе формируется итоговая оценка компетенций. Для достижения поставленной цели были рассмотрены математические модели различных авторов для оценивания компетенций обучающихся.

Методы исследования. Анализ математических моделей для оценивания компетенций. Рассмотрена работа авторов Макушкина Л.А и Фадеева М.В. «Разработка систе-

мы мониторинга учебной деятельности на базе компетентного подхода» из Уральского государственного университета. Авторы предложили математическую модель преобразования баллов, полученных студентами при выполнении заданий, в оценку их уровня усвоения компетенций [2, 3]. А также представили описание разработанной системы мониторинга учебной деятельности на основе компетентного подхода и результаты оценки эффективности данной системы [4, 5].

Математическая модель для определения уровня усвоения компетенций в процессе изучения дисциплины представлена следующим образом [2]

$$K_p rez = \frac{K_i sem \cdot 100}{K_i ball}, \quad (1)$$

где $K_i rez$ – результат освоения компетенции, %; $K_i sem$ – количество баллов по определенной компетенции; $K_i ball$ – избыточные баллы.

Недостатком данной математической модели является определение уровня усвоения компетенции в пределах одной дисциплины, так как одна и та же компетенция может являться результатом освоения двух и более дисциплин. Также отсутствует учет такого фактора, как трудоемкость дисциплин (в часах).

Братищенко В.В. в работе «Модель с латентными параметрами для оценки компетенций» предложил оценку компетенций в которой учитывается текущая успеваемость студентов. Предлагается декомпозировать каждое задание на отдельные компоненты и связать каждый из них с определенной компетенцией. Были разработаны структуры данных для системы учета текущей успеваемости, а также ее архитектура [6, 7]. Для записи оценок было создано мобильное приложение. Предлагается использовать теорию латентных переменных (Item Response Theory) в процессе оценки компетенций [8].

Другими авторами для оценки компетенций студентов технических вузов Берестневой О.Г., Марухиной О.В., Абунаваз Х.А. в работе «Алгоритмическое и программное обеспечение информационной системы оценки компетентности студентов технического вуза» представлен алгоритм оценки уровня компетенции студентов, основанный на методе нечеткого оценивания, который позволяет учитывать неполноту и качество информации, а также влияние человеческого фактора [9]. Данный алгоритм позволил разработать программный продукт для решения задач оценки компетенции студентов. Основное внимание уделено разработке алгоритмов оценки компонентов компетенции на основе экспертной оценки и тестовых технологий [10]. Математическая модель, используемая для вычисления суммарной оценки компетенций, выглядит следующим образом [9]

$$\mu_{\Sigma} = \left\{ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n O_{1ij} / I_1, \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n O_{2ij} / I_2, \dots, \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n O_{kij} / I_k \right\}, \quad (2)$$

где μ_{Σ} – суммарная оценка компетенций; O_{ij} , – степень соответствия I-ой компоненты компетентности оценочной категории ij.

Программный продукт также включает в себя разработанную математическую модель, которая способна оценить полный этап обучения от абитуриента до выпускника, также выявлена общая взаимосвязь социальной, информационно-технологической, интеллектуальной и ценностно-смысловой среды на формирование компетенции студентов [11].

Проведенный анализ работы авторов выявил, что оценивание компетенций определяется только по результатам тестов, как педагогических, так и психологических, не учитывая другие важные факторы, такие как текущая успеваемость, посещаемость и т.д., что не дает полной картины уровня формирования компетенций.

В отличие от ранее рассмотренной работы, где производилось оценивание полного этапа обучения от абитуриента до выпускника, авторами Борзых В.Э., Шалкиной Т.Н., Николаевой Д.Р. установлен приоритет на оценивание выпускников вузов. В своей работе «Метод математического моделирования процесса оценивания профессиональных компетенций выпускников вуза» они описывают подход к разработке математической модели

для оценки профессиональных навыков студентов вуза в процессе их обучения [12, 13]. Авторы объясняют важность и значение оценки сформированности профессиональных компетенций выпускников вуза; определяют критерии, уровни сформированности этих компетенций и представляют модель для оценки профессиональных навыков студентов. Основываясь на данной модели, авторы разработали систему для измерения профессиональных компетенций студентов [14, 15].

Авторы выделяют этапы моделирования процесса создания математической модели измерения и представляют основные алгоритмы для оценки профессиональных навыков. В статье предлагается новый оригинальный подход к разработке модели для оценки профессиональных компетенций, основанный на теории.

Также представлены результаты экспериментального исследования, где определена самая значимая статистически модель для оценки профессиональных навыков с применением множественного корреляционно-регрессионного анализа.

Математическая модель, разработанная авторами, выглядит следующим образом [12]

$$w^{[K]} = \frac{\Phi \cdot \theta^2}{\sigma}, \quad (3)$$

где w – оценка профессиональной компетенции; K – количество профессиональных компетенций; Φ – покомпонентная оценка учебных достижений студента; σ – оценка личностных характеристик студента; θ – оценка профессиональной мотивации студента.

Несомненными преимуществами данной математической модели являются: учет личностных характеристик студента и мотивации к изучению дисциплин, характеризующихся определенными компетенциями, а также учет результатов внеучебной деятельности студента (участие в олимпиадах, обучение по программе дополнительной профессиональной подготовки).

В области автоматизации систем оценивания компетенций студентов авторами В.В. Мирошниковым, А.В. Морозовой, Г.В. Ефимовой, Е.А. Митрошенковой выполнена работа «Автоматизированная система мониторинга уровня освоения компетенций студентами в процессе получения профессионального образования» представили новую автоматизированную систему отслеживания уровня освоения студентами компетенций с подробным описанием структуры программного обеспечения, базы данных и процесса формирования карты компетенций [16-18].

В разработке использовались современные методы проектирования и моделирования информационных систем. Разработанная авторами математическая модель для вычисления уровня развития компетенции выглядит следующим образом [16]

$$K_{\text{код комп.}} = \frac{\sum_{i=1}^n O_i T_i x_i}{\sum_{i=1}^N T_i}, \quad (4)$$

где T_i – трудоемкость изучения i -й дисциплины из рабочего учебного плана направления подготовки; n – число дисциплин, которые формируют данную компетенцию; $N = 1, 2, \dots, N$ – число изученных студентом дисциплин из предметного поля компетенции на данный момент времени; O_i – оценка уровня развития компетенции, освоенной студентом после изучения i -й дисциплины; x_i – доля i -й дисциплины в формировании компетенции j (вычисляется методом анализа иерархий).

Рассмотренная автоматизированная система обладает такими преимуществами: она способна создавать карту компетенций, учитывая трудоемкость различных видов деятельности и количество предметов, включающих определенную компетенцию. Однако в данной системе не учитывается ряд факторов, оказывающих влияние на эффективность формирования компетенций, таких как посещаемость, внеучебные мероприятия (соревнования, конференции, олимпиады), факультативные занятия и обучение дополнительным профессиям [19, 20].

Обсуждение результатов. Проведенный анализ позволил сформулировать вывод о том, что для модернизации компетентного подхода, а конкретно, для разработки математической модели оценивания компетенций, необходимо учитывать такие факторы как трудоемкость дисциплины, посещаемость студентами учебных занятий, участие во внеучебных мероприятиях, включающих в себя соревнования, олимпиады, конференции, обучение по программе дополнительной профессиональной подготовки.

Также необходимо учитывать, что оценка компетенции не всегда формируется только из одной дисциплины, а является междисциплинарной и включает в себя не только знания, умения и навыки, а также влияние социальной, информационно-технологической, интеллектуальной и ценностно-смысловой среды. Перспективно использовать теорию латентных переменных, позволяющую оценить латентные параметры, такие как уровень подготовленности студента и сложность предмета.

Вывод. В работе рассмотрены наиболее распространенные математические модели для оценивания компетенций освоение учебной программы обучающихся вузов, а также представлены предложения по модернизации компетентного подхода оценивания обучающихся высшего образования, построенные на основе исправления выявленных недостатков и использования преимуществ существующих математических моделей.

Достоинством разработанного компетентного подхода будет являться учет оценки компетенций не для отдельной дисциплины, а для целого комплекса дисциплин учебной программы (комплексная оценка компетенции).

Проведенный анализ существующих математических моделей оценивания компетенций позволил выявить необходимость учета таких параметров: посещаемость обучающихся, трудоемкость дисциплин, участие в мероприятиях внеучебной программы. Выявлено, что указанные параметры, необходимо определять из данных, взятых из советующих источников информации.

Параметры, влияющие на компетенцию оценивания, необходимо выявлять на определенном этапе обучения (например: в конце каждого семестра, на этапе становления студента выпускником) путем составления карты компетенций.

Математическая модель оценивания компетенций может быть внедрена в Байкальском государственном университете для повышения эффективности обучения по учебной программе.

Дальнейшие исследования будут направлены на разработку алгоритма функционирования автоматизированной системы оценки компетенций, а также использование данного алгоритма и математической модели для разработки программного обеспечения для оценки компетенций обучающихся.

Библиографический список:

1. Бычкова Ю.А. Современное состояние проблемы обеспечения оценки компетенций студентов высшего образования // Системный анализ в науке и образовании.-2023.-№ 4.-С.142-147.
2. Макушкина Л.А., Фадеева М.В. Разработка системы мониторинга учебной деятельности на базе компетентного подхода // Открытое образование.-2017.-№ 3.-С.29-38.
3. Михайленко Т.С. Компетентный подход в оценивании качества результатов обучения студентов // Научно-методический электронный журнал «Концепт». -2014.-№ 22.-С.51-55.
4. Зимняя И.А. Компетентность и компетентность в контексте компетентного подхода в образовании // Иностранные языки в школе.-2012.-№ 6.-С.2-10.
5. Рыбанов А.А., Макушкина Л.А. Технология определения весовых коэффициентов сложности тем дистанционного курса на основе алгоритма Саати // Открытое и дистанционное образование.-2016.-№ 1.-С.69-79.
6. Братищенко В.В. Модель с латентными параметрами для оценки компетенций // Новые информационные технологии в образовании и науке. Российский государственный профессионально-педагогический университет.-2017.-№ 2.-С.46-51.

7. Братищенко В.В. Кешиков К.А. Оценивание компетенций студентов вуза по данным учета текущей успеваемости // Современные проблемы профессионального образования: опыт и пути решения.-2016.-№ 1.-С.163-167.
8. Братищенко В. В. Оценка сформированности компетенций по данным текущей успеваемости // Актуальные вопросы аграрной науки.-2018.-№ 28.-С.31-37. <https://elar.rsvpu.ru/handle/123456789/28293>
9. Берестнева О.Г., Марухина О.Г., Абунаваз Х.А. Алгоритмическое и программное обеспечение информационной системы оценки компетентности студентов технического вуза // Известия Томского политехнического университета.-2006.-№ 7.-С.240-245.
10. Берестнева О.Г., Шаропин К.А., Марухина О.В. Экспертная система оценки компетентности выпускников технического университета // Искусственный интеллект.-2004.-№ 4.-С.264–267.
11. Берестнева О.Г., Иванов В.Т., Иванкина Л.И., Шаропин К.А. Комплекс психофизиологического обследования студентов. Назначение, структура, результаты // Известия Томского политехнического университета.-2003.-№ 306(2).-С.57–63.
12. Борзых В.Э., Шалкина Т.Н., Николаева Д.Р. Метод математического моделирования процесса оценивания профессиональных компетенций выпускников ВУЗа // Проблемы науки и образования.-2015.-№ 1(1).-С.106-120.
13. Аскеров Э.М., Рудинский И.Д. Автоматизация многокритериального оценивания профессиональных компетенций будущих специалистов//Информатизация образования и науки.-2008.-№ 3(7).-С.82-89.
14. Попов Г.В., Забегалина Т.В. Оценка профессиональных компетенций //Методы менеджмента и качества.-2007.-№ 6.-С.40-43.
15. Скорев, М.М., Олейникова Н.С. Квалификационная яма: теоретический и методический подходы // Наука и образование: хозяйство и экономика; предпринимательство; право и управление.-2020.-№ 2(111).-С.23-25.
16. Мирошников В.В., Митрошенкова Е. А. Автоматизированная система оценки и мониторинга уровня освоения компетенций студентами: организационно-методическое обеспечение // Вестник Брянского государственного технического университета.-2019.-№ 1(74).-С.77-84.
17. Мирошников В.В., Митрошенкова Е.А. Система мониторинга качества обучения студентов при компетентностном подходе // Вестник Брянского государственного технического университета.-2015.-№ 2.-С.152-160.
18. Родионов А.В. Использование методов когнитивного моделирования для построения компетентностно-ориентированного образовательного процесса // Теоретические и прикладные аспекты современной науки.-2015.-№ 7(1).-С.19-24.
19. Тигина М.А. Алгоритм оценки уровня сформированности компетенций // Вестник МГУП имени Ивана Федорова.-2014.-№ 3.-С. 248-252.
20. Литвинов В. А. К вопросу об оценке сформированности компетенций обучающихся при проведении промежуточных и итоговой аттестации // Современное образование.-2019.-№ 1.-С.85–91.

References:

1. Bychkovskaya Y.A. The current state of the problem of ensuring the assessment of competencies of students of higher education. *System analysis in science and education*.2023;4:142-147. (In Russ)
2. Makushkina L.A., Fadeeva M.V. Development of a system for monitoring educational activities based on a competence-based approach. *Open education*.2017;3:29-38. (In Russ)
3. Mikhailenko T.S. A competence-based approach to assessing the quality of student learning outcomes. *Scientific and methodological electronic journal "Concept"*. 2014; 22:51-55. (In Russ)
4. Zimnaya I.A. Competence and competence in the context of a competence-based approach in education. *Foreign languages at school*.2012.6:2-10. (In Russ)
5. Rybanov A.A., Makushkina L.A. Technology for determining the weighting coefficients of the complexity of distance learning topics based on the Saati algorithm. *Open and distance education*.2016.1:69-79. (In Russ)
6. Bratyshchenko V.V. A model with latent parameters for assessing competencies. New information technologies in education and science. *Russian State Vocational Pedagogical University*.2017;2:46-51(In Russ)
7. Bratischenko V.V. Keshikov K.A. Assessment of university students' competencies based on current academic performance data. *Modern problems of vocational education: experience and solutions*.2016;1:163-167(In Russ)
8. Bratischenko V.V. Assessment of the formation of competencies according to current academic performance. *Actual issues of agrarian science*.2018;28:31-37(In Russ)
9. Berestneva O.G., Marukhina O.G., Abunavas H.A. Algorithmic and software support of the information system for assessing the competence of students of a technical university. *Proceedings of Tomsk Polytechnic University*.2006;7:240-245 (In Russ)

10. Berestneva O.G., Sharopin K.A., Marukhina O.V. Expert system for assessing the competence of graduates of a technical university. *Artificial intelligence*.2004;4:264-267. (In Russ)
11. Berestneva O.G., Ivanov V.T., Ivankina L.I., Sharopin K.A. Complex of psychophysiological examination of students. Purpose, structure, results. *Proceedings of Tomsk Polytechnic University*.2003;306(2):57-63. (In Russ)
12. Borzykh V.E., Shalkina T.N., Nikolaeva D.R. Method of mathematical modeling of the process of evaluating professional competencies of university graduates. *Problems of science and education*.2015;1(1):106-120. (In Russ)
13. Askerov E.M., Rudinsky I.D. Automation of multi-criteria assessment of professional competencies of future specialists. *Informatization of education and science*.2008;3(7):82-89. (In Russ)
14. Popov G.V., Zabegalina T.V. Assessment of professional competencies. *Methods of management and quality*.2007;6:40-43. (In Russ)
15. Skorev, M.M., Oleinikova N.S. Qualification pit: theoretical and methodological approaches. *Science and education: economy and economics; entrepreneurship; law and management*.2020;2(111):23-25. (In Russ)
16. Miroshnikov V.V., Mitroschenkova E. A. Automated system for assessing and monitoring the level of competence development by students: organizational and methodological support. *Bulletin of the Bryansk State Technical University*.2019;1(74):77-84. (In Russ)
17. Miroshnikov V.V., Mitroschenkova E. A. The system of monitoring the quality of student education with a competence-based approach. *Bulletin of the Bryansk State Technical University*.2015;2:152-160. (In Russ)
18. Rodionov A.V. Using cognitive modeling methods to build a competence-oriented educational process *Theoretical and applied aspects of modern science*.2015;(1):19-24. (In Russ)
19. Tigina M.A. Algorithm for assessing the level of competence formation. *Bulletin of the Moscow State University Enterprise named after Ivan Fedorov*.2014. 3:248-252. (In Russ)
20. Litvinov V.A. On the issue of assessing the formation of students' competencies during intermediate and final attestation. *Modern education*.2019.1:85-91 (In Russ)

Сведения об авторах:

Бычковская Юлия Александровна, аспирант кафедры математических методов и цифровых технологий; juli.mis@yandex.ru.

Бычковский Владимир Сергеевич, старший преподаватель кафедры автоматизации производственных процессов; bikovskii_vs@mail.ru.

Information about authors:

Julia A. Bychkovskaya, Postgraduate student, Department of Mathematical Methods and Digital Technologies; juli.mis@yandex.ru.

Vladimir S. Bychkovsky, Senior lecturer, Department of Automation of Production Processes; bikovskii_vs@mail.ru.

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 07.05.2024.

Одобрена после/рецензирования Revised 19.07.2024.

Принята в печать/ Accepted for publication 29.09.2024.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 004.056



DOI: 10.21822/2073-6185-2024-51-4-40-49

Оригинальная статья /Original article

**Об оценивании устойчивости функционирования объектов
микропараметрического страхования киберрисков**

В.А. Воеводин

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

Резюме. Цель. Статья посвящена проблеме оценивания устойчивости функционирования объектов критической информационной инфраструктуры в интересах микропараметрического страхования киберрисков. Обосновывается целесообразность внедрения параметрического страхования как экономического способа обеспечения защиты информации в условиях воздействия угроз и существование проблемы оценивания устойчивости. **Метод.** Применение методов теории надежности в сочетании с методами теории случайных функций позволило учесть динамику устойчивости функционирования объекта защиты на периоде воздействия угроз. **Результат.** В результате представилось возможным получить оценку минимального значения показателя устойчивости функционирования объекта оценивания и соответствующего момента времени наступления этого события, что в совокупности позволило оценить риск, связанный с этим событием. Новизна предлагаемого подхода заключается в том, что для оценивания киберрисков использовалась функция устойчивости объекта оценивания, которая формировалась на основе функций устойчивости отдельных элементов, входящих в состав объекта оценивания с учетом его структуры и имеющегося в распоряжении, для поддержания функциональности, ресурса. Приводится постановка задачи оценивания рисков информационной безопасности (ИБ) для различных структур и описание методов решения задачи параметрического микрострахования, которые сосредоточены на оценивании важности каждого из элементов, входящих в состав объекта страхования. **Вывод.** Материалы статьи могут быть использованы при постановке задачи по разработке методов, моделей и средств обеспечения страхования рисков ИБ, а также при поддержке решений по обеспечению устойчивости.

Ключевые слова: риск, функция устойчивости, устойчивость функционирования, параметрическое страхование, микропараметрическое страхование

Для цитирования: В.А. Воеводин. Об оценивании устойчивости функционирования объектов микропараметрического страхования киберрисков. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2024; 51(4):40-49. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-4-40-49

**On assessing the sustainability of functioning of microparametric
cyber risk insurance facilities**

V.A. Voevodin

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

Abstract. Objective. The article is devoted to the problem of assessing the durability of critical information infrastructure objects in favor of microparametric risk insurance. The feasibility of introducing parametric insurance as a cost-effective way to protect information against threats and the existence of sustainability problems is being supported. **Method.** The application of reliability theory methods in combination with random function theory allowed to consider the

dynamics of stability of operation of the protection object during the period of the action of threats. **Result.** It was possible to estimate the minimum value of the rating object's performance and the relevant time of occurrence, which in combination allowed for an assessment of the risk associated with the event. The novelty of the proposed approach is that for cyber risk assessment, a function of the object of assessment was performed, which was formed on the basis of the functions of individual elements of the evaluation object, taking into account its structure and available resources for maintaining functionality. The information security (IS) assessment task for different structures and the Parametric Micro-Insurance Solution Methodologies are described, which focus on the importance of each of their elements as part of the insurance object. **Conclusion.** The article's content can be used to set the task of developing methods, models and means for providing IS risk insurance as well as supporting solutions for ensuring sustainability.

Keywords: risk, resilience function, performance resilience, parametric insurance, microparametric insurance.

For citation: V.A. Voevodin. On assessing the sustainability of functioning of microparametric cyber risk insurance facilities. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2024; 51(4):40-49. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-4-40-49

Введение. Анализ публикаций по прогнозированию развития и моделированию мировой динамики [1] и долгосрочному технико-экономическому планированию [2, 3] позволяют утверждать, что развитие производства в рамках современного технологического уклада привело к интеграции физических (продуктовых), финансовых (денежных) потоков и информационных процессов. При этом современный технологический уклад все больше ориентируется на управление экономикой через управление рисками [4]. Интеграция продуктовых и информационных потоков и рискориентированный подход к управлению экономикой открыли возможности по интенсификации производства посредством внедрения информационных технологий (ИТ). Однако, экономическая деятельность таких хозяйствующих субъектов (организаций) становится все более уязвимой для угроз информационной безопасности (ИБ) [5-11].

С ростом внедрения информационных технологий и цифровых экосистем создаются нематериальные активы, при этом нематериальные активы современных компаний растут опережающими темпами [1-4]. В такой обстановке страхование призвано снижать рисковую нагрузку хозяйствующих субъектов, в том числе и в условиях воздействия угроз ИБ. В этих условиях привлекательным направлением развития страхового рынка становится страховое обеспечение управления рисками ИБ [12, 13]. В значительной степени это связано с потребностью хозяйствующих субъектов управлять рисками ИБ.

В предыдущей доктрине ИБ страхование рисков ИБ позиционировалось как экономический метод обеспечения информационной безопасности РФ, для внедрения которого предполагалось создание системы страхования информационных рисков физических и юридических лиц, в действующей доктрине ИБ [14] этот метод исключен.

Постановка задачи. Сегодня обеспечение ИБ имеет в своем фундаменте директивные (императивные) начала [15], которые предполагают государственное регулирование отношений в сфере защиты информации посредством установления требований к защите информации и ответственности за их нарушение. При таком подходе решение об обеспечении ИБ принимает регулятор, а не сам хозяйствующий субъект, что порождает парадоксальную, ситуацию при которой угроза исходит от регулятора, но об рискориентированном подходе к обеспечению ИБ речи вообще ни идет. Для внедрения страховой поддержки хозяйствующих субъектов в области обеспечения ИБ требуется совершенствование правового поля, регулирующего отношения при управлении рисками ИБ.

Убытки от компьютерных атак являются существенными, быстро растущими и должны компенсироваться развивающимся рынком страхования рисков ИБ. Однако сложный процесс количественного оценивания ущерба, требующий существенных

временных затрат, не позволяет своевременно получить страховую выплату, что не обеспечивает оперативное реагирование на инцидент ИБ, а также отрицательно отражается на востребованности страхования, как экономического инструмента обеспечения ИБ. На практике очень часто ИБ рассматривают как центр затрат, в то время как ее следует рассматривать как средство для развития бизнеса и его финансовой защиты.

Привлекательным направлением в развитии страхования рисков ИБ является параметрическое страхование, или страхования с фиксированным возмещением, заключается в возможности повысить доверие. Доверие обеспечивается балансом между наступлением события и страховой выплатой, причем выплатой в реальном времени и без учета ущерба. Для этого требуется триггер, с помощью которого фиксируется страховое событие.

Параметрическое страхование направлено на обеспечение определенности покрытия путем минимизации базового риска традиционной политики возмещения, т. е. риска несоответствия между ожиданиями страхователя в отношении покрытия и фактической выплатой возмещения, произведенной в соответствии с договором. При параметрическом страховании не требуется предоставлять подробную информацию о потерях, такую как сумма понесенных убытков. Например, в случае прерывания бизнеса, в полисе может быть предусмотрено, что страховщик будет выплачивать $X\%$ от лимита за каждый день простоя, за прерванную услугу, вызванную одним из партнеров. Для определения страховой премии требуется оценка устойчивости функционирования информационной инфраструктуры (ИИ) страхуемого объекта информатизации, особенно для условий воздействия угроз ИБ [16-18]. Для чего необходимы исходные данные, содержащие оценки устойчивости функционирования отдельных элементов в условиях угроз ИБ, которые входят в состав ИИ соответствующего субъекта. Если для штатных условий применения объекта информатизации имеется потенциальная возможность добыть репрезентативную статистику частных показателей устойчивости, то это позволяет использовать ее для оценки количественные методы теории надежности. Зная оценки устойчивости отдельных элементов в штатных условиях применения, представляется возможным оценить, для этих же условий, устойчивость функционирования ИТКС в целом.

Совсем другие условия для нештатного применения. Репрезентативная статистика отсутствует в принципе, что порождает ряд особенностей при оценке устойчивости функционирования ИТКС. Такая ситуация связана, прежде всего, с тем, что сами нештатные условия порождены воздействием угроз ИБ, связанных с поведением лиц, принимающих решения по ее обеспечению, в том числе и источника угроз.

Воздействия угроз, в этом случае, можно позиционировать как редкие явления, их длительность непредсказуема, сама обстановка при нештатных условиях весьма нестабильна. В этих условиях процессы исследуемых событий нельзя принять ни стационарными, ни эргодическими, ни стохастическими. Названные особенности не позволяют в полной мере применить классические методы математической статистики и теории вероятностей. Для решения задачи требуется разработка специальных методов оценки функциональной устойчивости с учетом вышеназванных особенностей [19-22]. Такая неопределенность позиционируется как эпистатическая, и зависит от уровня знаний об исследуемом объекте. Именно разделение риска ИБ со страховщиком является привлекательным в условиях воздействия угроз ИБ. Однако адекватных инструментов оценки рисков ИБ для таких условий нет.

Методы исследования. На текущий момент существует некое стартовое семейство методических инструментов, способствующих внедрению страхования рисков ИБ. Так, Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 20 мая 2021 г. № 420-ст утвержден национальный стандарт ГОСТ Р 59516 «Информационные технологии [12]. Принятый стандарт содержит рекомендации: по совершению покупки услуг страхования рисков ИБ как способа распределения риска ИБ со страховщиком; управлению последствиями инцидентов с помощью средств страхового покрытия;

организации коммуникации между страхователем и страховщиком с целью поддержания андеррайтинга, мониторинга и претензионной работы. Основные сведения о математическом обеспечении оценивания рисков информационной безопасности применительно к условиям воздействия угроз ИБ опубликованы [16, 19-22]. Зарегистрирована программа для ЭВМ [23], позволяющая автоматизировать процедуру оценивания рисков ИБ и получать количественные оценки уровня защищенности ИТКС, функционирующих в условиях воздействия угроз.

Следующая идея, которая может положительно повлиять на развитие рынка страхования рисков ИБ и стать признаком страховой компании 2030 – это внедрение «микрострахования», предоставляемого с помощью инновационного, параметрического страхования. Внедрение микростархования позволит расширить выбор страхового продукта тем самым не страховать информационную систему в целом, а страховать лишь самые уязвимые элементы. Для того чтобы реализовать предлагаемый алгоритм, требуется инструмент, который бы позволял по заданным исходным данным, характеризующим защищенность того или иного элемента от воздействия угроз, его восстанавливаемость в случае поражения. и его место в составе информационной инфраструктуры в целом, оценивать его важность (критичность). Имея такой инструмент, возможно было бы страховать не всю информационную систему, а отдельные ее элементы, повышая тем самым привлекательность соответствующих страховых продуктов и эффект от страхования рисков ИБ.

Задачу оценивания устойчивости функционирования объекта критической информационной инфраструктуры (КИИ) в условиях воздействия угроз ИБ целесообразно формулировать отдельно для каждой из возможных структур ИТКС – (1-1), (1- N), (N - N)-полюсные структуры. При постановке задачи принимается ограничение, суть которого заключается в том, что органы управления субъекта КИИ способны принимать управленческие решения и им требуется обмен сообщениями между элементами системы управления (связность) с требуемым качеством, который обеспечивается с помощью информационно-телекоммуникационной сети (ИТКС) [20]. В этом случае показатель связности ИТКС может служить информативной характеристикой устойчивости ее функционирования. Для (1-1)-полюсной структуры задача оценивания устойчивости ИТКС может быть решена посредством разработки методов, моделей и средств оценивания связности между парой абонентов A и B (рис. 1).

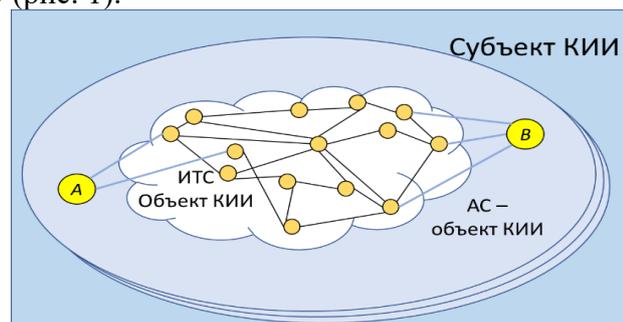


Рис. 1. Вариант (1-1)-полюсной структуры информационно-телекоммуникационной сети
Fig. 1. Option (1-1)-pole information and telecommunications network structure

Для оценивания устойчивости двухполюсной структуры в качестве показателя была выбрана вероятность связности между абонентами A и B . При этом учитывается допущение, что возможность повреждения самих взаимодействующих абонентов при оценивании устойчивости ИТКС не учитывается, поэтому вероятность их поражения принимается равной нулю. Подобные задачи характерны для систем взаимодействия. В качестве показателя связности используется значение бинарной переменной e , принимающая одно из двух альтернативных значений $e=1$, когда между абонентами существует хотя бы один путь для обмена сообщениями, $e=0$ – в противном случае. Обмен сообщениями между абонентами обеспечивается с помощью ИТКС, имеющей (1-1)-полюсную структуру.

При этом принимается допущение, что возможность повреждения самих взаимодействующих абонентов при оценивании устойчивости ИТКС не учитывается.

Для (1- N)-полюсной структуры задача заключается в разработке методов и моделей для оценивания связности между центральным абонентом (управляющим) и N подчиненными (управляемыми) абонентами (рис. 2).

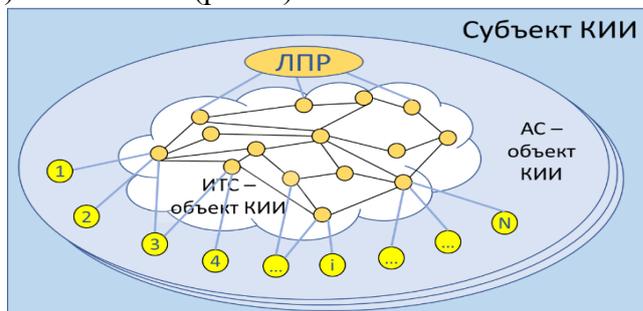


Рис. 2. Вариант (1- N)-полюсной структуры информационно-телекоммуникационной сети

Fig. 2. Option (1- N)-pole structure of information and telecommunication network

Подобные задачи характерны для систем централизованного управления. Центальному полюсу сопоставляется высшее звено системы управления объекта КИИ, осуществляющее формирование и передачу управляющих приказов (сигналов) централизованного управления, а также, прием, обработку донесений об исполнении команд от управляемых объектов. Конечным полюсам сопоставляются управляемые элементы (объекты управления), которые в ответ на управляющие команды, поступающие от ЛПР, обеспечивают их исполнение, формируют и передают соответствующие донесения.

Таким образом реализуются информационные технологии для поддержки процессов централизованного управления. Связность каждого периферийного элемента с центральным обеспечивается фрагментом ИТКС, имеющим двухполюсную структуру, которая может быть обозначена совокупностью (1, i)-двухполюсных структур, $i=1, 2, \dots, N$, где N – число управляемых объектов или число двухполюсных структур. Объект управления считается управляемым если он находится в состоянии «функционален» и имеет возможность двустороннего обмена сообщениями с ЛПР.

Постановка задачи оценивания устойчивости ИТКС на вербальном уровне может быть сформулирована следующим образом: пусть имеется центральный элемент оцениваемой системы управления, который позиционируется как ЛПР, и N периферийных элементов обеспечивающих исполнение управляющих команд и формирующих соответствующее донесение об их исполнении, требуется разработать методы, модели и средства для оценивания устойчивости функционирования ИТКС.

Для (N - N) структуры (рис. 3) задача оценивания устойчивости ИТКС может быть сформулирована следующим образом: пусть имеется K пар абонентов, между которым требуется обеспечить обмен сообщениями в условиях воздействия угроз безопасности информации.

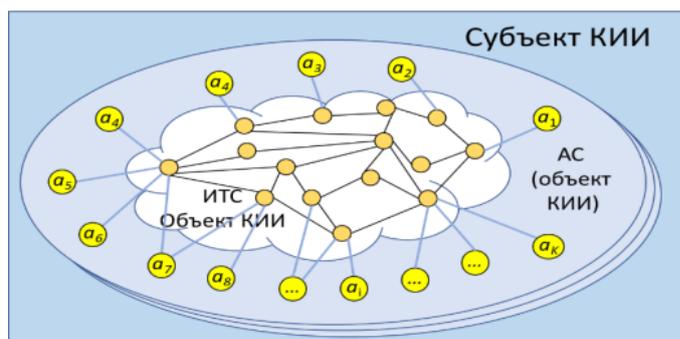


Рис. 3. Вариант (N - N)-полюсной структуры информационно-телекоммуникационной сети

Fig. 3. Variant (N - N)-pole structure of information and telecommunication network

Таким образом реализуется технологический процесс взаимодействия между объектами КИИ. Связность между абонентами обеспечивается совокупностью $(1,i)$ -двухполосных структур, $i=1, 2, \dots, K$, где K – число возможных взаимодействующих пар. При этом принимается условие, что возможность поражения самих взаимодействующих элементов не учитывается.

Обсуждение результатов. Постановка частных задач оценивания важности элементов, входящих в состав объекта информатизации. Для заданных исходных данных, характеризующих:

а) сценарий воздействия угроз $Z = \{\eta_k, n\}$, η_k – ожидаемый момент времени воздействия k -й угрозы, n – ожидаемое число воздействий угроз в течение периода $(0, T]$, T – ожидаемый момент времени окончания массированного воздействия угроз. Характеристики сценария воздействия угроз определяются экспертными методами, в ходе учений или путем регистрации соответствующих событий, если таковые имели место;

б) структуру ИТКС $S = \{A, L\}$, где $A = \{a_i\}$ – множество элементов, входящих в состав структуры оцениваемого объекта, $i=1, 2, \dots, N$, N – мощность множества A , $L = \{l_{ij}\}$ – множество связей между элементами, l_{ij} – идентификатор ij -й связи, если связи между i -м и j -м элементами предусмотрена проектной документацией то $l_{ij} = 1$, $l_{ij} = 0$ – в противном случае. $l_{ij} = -1$, если связь была предусмотрена проектной документацией, но была нарушена в результате воздействия угрозы. Определяется на основании технической документации на объект;

в) защищенность от воздействия угроз отдельных элементов $P(u) = \{p_i(u)\}$, где $p_i(u)$ – вероятность поражения i -го элемента при воздействии u -й угрозы ИБ, $u \in U_i$, где U_i – множество актуальных угроз для i -го элемента. Определяется экспертными методами, в ходе учений;

г) $V(u) = \{v_i(u)\}$ восстанавливаемость функциональности объекта информатизации после воздействия u -й угрозы, где v_i – показатель, характеризующий восстанавливаемость i -го элемента, $v_i(u) = \{\tau_{in}(u), \tau_{iv}(u)\}$, где $\tau_{in}(u)$ – нижняя оценка времени восстановления функциональности i -го элемента при воздействии u -й угрозы, τ_{iv} – верхняя оценка времени восстановления функциональности i -го элемента при воздействии u -й угрозы. Определяются с помощью моделирования процесса восстановления функциональности либо с помощью экспертных методов, либо в результате учений;

д) Π_0 – показатель, характеризующий требуемые производственные возможности подсистемы восстановления функционала: $\Pi_0 = \{R_0, D_0\}$, где $R_0 = \{r_{0i}\}$ – совокупность типов расходуемого ресурса, имеющегося в составе системы восстановления функциональности для восстановления элемента, $i=1, 2, \dots, m$; m – число типов невозобновляемого ресурса (пример невозобновляемого ресурса – запасные части, расходный материал и т. п.); $D_0 = \{d_{0i}\}$ – совокупность типов возобновляемого ресурса, имеющегося в составе системы восстановления функционала, $i=1, 2, \dots, k$, k – число типов возобновляемого ресурса (пример возобновляемого ресурса – люди, измерительные приборы и т. п., которые могут использоваться многократно);

е) показатель, характеризующий требуемые производственные возможности расчета восстановления: $\Pi^{Tp} = \{R^{Tp}, D^{Tp}\}$ – показатель, характеризующий требуемые производственные возможности расчета восстановления, где $R^{Tp} = \{r_i^{Tp}\}$ – совокупность соответствующих единиц невозобновляемого ресурса каждого типа, требуемых для восстановления функционала элемента после успешного воздействия угрозы безопасности информации по i -му элементу, $i=1, 2, \dots, m$, m – число требуемых типов расходуемого ресурса для восстановления функциональности i -го элемента; $D^{Tp} = \{d_i^{Tp}\}$ – совокупность типов возобновляемого ресурса, требуемого для восстановления функциональности i -го элемента, $i=1, 2, \dots, k$, k – число требуемых типов возобновляемого ресурса. Требуется разработать методы, модели и средства для оценивания «веса», «значимости» и «вклада»

элементов, входящих в состав объекта страхования. Поставленная задача решается в следующем порядке:

а) разрабатываются методы и модели в соответствии с [19, 21] для расчета функций живучести $\varphi_i(t)$ отдельных элементов, входящих в состав оцениваемого объекта (ИТКС);

б) с помощью методов и моделей, приведенных в [20, 23], рассчитывается функция живучести $\Phi(t)=\{\varphi_i(t)\}$ объекта оценивания и осуществляется поиск ее минимального значения $\Phi_m = \min_{t \in (0, T]} (Z, S, P(u), V(u), \Pi_0, t)$. Функция живучести оцениваемого объекта

характеризует вероятность того, что он будет находиться в состоянии «функционален» в момент времени $t, t \in (0, T]$.

в) с помощью методов, моделей и средства, приведенных в [24], осуществляется оценивание «веса», «значимости» и вклада отдельных элементов в обеспечение устойчивости функционирования объекта ИТКС.

Понижение минимального значения Φ_m функции живучести $\Phi(t)$ ниже некоторого, наперед заданного порогового значения $\Phi_{\text{тр}}$, предлагается использовать в качестве триггера, обозначающего наступление страхового события.

Для методической поддержки параметрического микрострахования потребуются модели и методы, позволяющие оценить важность каждого из элементов и, на основании этой оценки, задать соответствующий триггер. Но при этом предлагается использовать функции живучести отдельных элементов $\varphi_i(t)$ и показатели, характеризующие важность $w_i = \{\text{вес}_i, \text{значимость}_i, \text{вклад}_i\}$ каждого из элементов в обеспечении устойчивости функционирования объекта оценивания в целом.

Вес [24]. Это показатель важности элемента, который может использоваться при отсутствии информации об устойчивости его функционирования. Вес элемента характеризует относительное число таких *критических* состояний объекта, в которых потеря функциональности данного элемента приводит к потере функциональности всего объекта (и, наоборот, восстановление его функциональности приводит к восстановлению функциональности всего объекта), среди всех возможных состояний оцениваемого объекта. Вес элемента характеризует только местоположение его в структуре объекта.

Значимость [24]. Это показатель важности элемента, который характеризует изменение вероятности сохранения функциональности объекта оценивания при условии, что оцениваемый элемент «функционален» и «не функционален». Другими словами, этот показатель отражает как реагирует показатель устойчивости функционирования объекта в целом на исключение оцениваемого элемента из структуры. Вес элемента есть частный случай его значимости при одинаковой функциональности всех элементов и вероятности сохранения функциональности равной 0,5. Показатель значимости характеризует не только местоположение оцениваемого элемента, но и зависимость от вероятности сохранения функциональности всех других элементов, кроме самого оцениваемого элемента.

Вклад [24]. Это показатель важности элемента, который характеризует местоположение оцениваемого элемента в структуре объекта, условия ее функционирования и связь с вероятностью безотказной работы всех элементов, включая и оцениваемый элемент.

Таким образом, приведенные частные показатели важности элементов имеют различную информационную сущность и позволяют реализовать параметрическое микрострахование рисков ИБ.

Для оценивания названных характеристик требуется формализованное (аналитическое) описание условий функциональности объекта оценивания. Недостатком существующих методов оценивания, ссылки на которые приведены выше, является именно невысокая степень формализации процедуры оценивания для условий воздействия угроз. Основной целью, связанной с оцениванием устойчивости функционирования того или иного объекта, является стремление очистить объект от всего вторичного, рассмотреть лишь его наиболее характерные признаки. Таким образом, в качестве модели информаци-

онной системы предлагается выбирать ее структурную схему, отображающую некоторую совокупность отношений.

Знание структурной схемы объекта оценивания дает возможность определять «слабые места», сосредотачивать страховые усилия на наиболее важных, с точки зрения обеспечения функциональности объекта, элементах. При этом методы исследования структуры позволяют не только количественно оценивать устойчивость функционирования, но и оценивать роль отдельных элементов (и их различных комбинаций) в обеспечении устойчивости функционирования всего объекта оценивания. С этой целью предлагается использовать показатель важности того или иного элемента, который может отражать «вес», «значимость», «вклад» элемента в процессе обеспечения устойчивости функционирования всего объекта в целом.

Вывод. Таким образом, зная оценку важности того или иного элемента, можно обосновать решение о необходимости страхования рисков, связанных с нарушением его функционала. При этом возможно мотивированно отказаться от страхования риска потери функциональности всего объекта и сосредоточиться на самых уязвимых элементах. Предлагаемый подход позволяет управлять страховой премией, страховым покрытием, а также страховать наиболее важные элементы и воздерживаться от страхования менее значимых, принимая риск на себя. Внедрение параметрического и микропараметрического страхования позволит обеспечить гибкость управления рисками ИБ. Перспективным направлением исследования является разработка методов и моделей построения функций «веса», «значимости», «вклада» на рассматриваемом интервале времени воздействия угроз, что позволит учитывать их динамику при принятии решения.

Благодарности. Статья подготовлена при поддержке Фонда Потанина.

Acknowledgments. The article was prepared with the support of the Potanin Foundation.

Библиографический список:

1. Садовничий В.А., Акаев А.А., Коротаев А.В., Малков С.Ю. Моделирование и прогнозирование мировой динамики / Научный совет по Программе фонд. исслед. Президиума Российской академии наук «Экономика и социология знания». – М.: ИСПИ РАН (Экономика и социология знания), 2012. – 359 с.
2. Глазьев С.Ю. Экономика и общество / С.Ю. Глазьев, А.В. Щипков. – Москва : Общество с ограниченной ответственностью "Проспект", 2022. – 192 с.
3. Глазьев С.Ю. Стратегия опережающего развития России в условиях глобального кризиса / С.Ю. Глазьев. – Москва : Экономика, 2010. – 287 с.
4. Энциклопедия финансового риск-менеджмента [В.Е. Барбаумов и др.] ; под ред. А.А. Лобанова и А.В. Чугунова. – 4-е изд. – Москва : Альпина Бизнес Букс, 2009. – 931 с.
5. R. Sobers, “98 must-know data breach statistics for 2021” Varonis, May 2021.
6. F. Perumannil, Sabir & Haneef, “Latest trends in cybersecurity after solarwind hacking attack,” Journal of Cyber Security and Mobility, vol. 1, Jan. 2021.
7. O. Analytica, “Critical infrastructure sees rising cybersecurity risk” Emerald Expert Briefings, 2021.
8. F. Curti et al., “Cyber risk definition and classification for financial risk management” Federal Reserve Bank of Richmond, 2019.
9. Gartner, Inc., “Reviews for security threat intelligence products and services reviews and ratings” Worldwide In: Gartner peer insights. <https://www.gartner.com/reviews/market/security-threat-intelligence-services>, 2019.
10. Coulson, T., Mason, M., & Nestler, V. (2018). Cyber capability planning and the need for an expanded cybersecurity workforce. Communications of the IIMA: Vol. 16: Iss. 2, Article 2 DOI: <https://doi.org/10.58729/1941-6687.1401>. Retrieved March 6, 2023, from <https://scholarworks.lib.csusb.edu/ciima/vol16/iss2/2/BitSight>, “Global financial firm reduces risk of third-party breach with bitsight security ratings,” BitSight Website: <https://info.bitsight.com/bitsightcase-study-global-financial-firm>, 2019.
11. Hoffmann, R., Napiórkowski, J., Protasowicki, T., & Stanik, J. Risk based approach in scope of cybersecurity threats and requirements. Procedia Manufacturing, 2020;44:655-662 <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.02.243>.
12. ГОСТ Р 59516–2021. Информационные технологии. Менеджмент информационной безопасности. Правила страхования рисков информационной безопасности. Утвержден и введен в действие

- Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 20 мая 2021 г. N 420-ст. М.: Стандартиформ. 2021. – 20 с.
13. Косарев А.В. Страхование информационных рисков : автореферат дис. ... кандидата экономических наук : 08.00.10 / Финансовая акад. при Правительстве РФ. - Москва, 2004. - 23 с.
 14. Доктрина информационной безопасности Российской Федерации, утверждена Указом Президента Российской Федерации от 05.12.2016 г. № 646 // Консультант Плюс: справ.-правовая система.
 15. Федеральный закон "Об информации, информационных технологиях и защите информации" от 27.07.2006 N 149-ФЗ // СПС Консультант Плюс: справ.-правовая система.
 16. Воеводин В.А. Генезис понятия структурной устойчивости информационной инфраструктуры автоматизированной системы управления производственными процессами к воздействию целенаправленных угроз информационной безопасности // Вестник Воронежского института ФСИИ России. 2023. № 2. С. 30–41.
 17. Методика оценки угроз безопасности информации. Методический документ ФСТЭК России от 5 февраля 2021г. Официальный сайт ФСТЭК России [Электронный ресурс]. – URL: <https://fstec.ru/component/attachments/download/2919> (дата обращения 08.04.2021).
 18. Васильев В.И., Вульфин А.М., Кириллова А.Д., Кучкарова Н.В. Методика оценки актуальных угроз и уязвимостей на основе технологий когнитивного моделирования и Text Mining // Системы управления, связи и безопасности. 2021. № 3. С. 110–134. DOI: 10.24412/2410-9916-2021-3-110-134.
 19. Воеводин В.А. Математическая модель оценивания устойчивости функционирования элемента информационной инфраструктуры автоматизированной системы управления, подверженной воздействию угроз информационной безопасности. "Информационные технологии», №1. Том 30. 2024. DOI: 10.17587/it.30.23-31. С. 23–31.
 20. Воеводин В.А., Крахотин Н.А. Методы оценивания связности неориентированного двухполюсного помеченного графа с учетом деструктивного воздействия внешних угроз на его вершины . Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2024; 51(1):46-60. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-1-46-6046
 21. Воеводин В.А. Модель оценки функциональной устойчивости элементов информационной инфраструктуры для условий воздействия множества компьютерных атак. Информатика и автоматизация. 2023. Том 22 № 3. – С. 691–715. <https://DOI 10.15622/ia.22.3.8>.
 22. Воеводин В.А., Виноградов И.В., Волков Д.И. Об оценке устойчивости функционирования объекта информатизации в условиях компьютерных атак при экспоненциальном законе распределения времени до воздействия противника и восстановления работоспособности. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022; 49(3): 39-51. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-3-39-51.
 23. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023683185 РФ. Программа расчета функции живучести графа двухполюсной структуры, подверженной угрозам информационной безопасности. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2024614666 от. 28.02.2024. (RU). Бюл. № 3 28.02.2024. Воеводин В.А., Крахотин Н.А.
 24. Хохлачев Е. Н. Организация и технологии выработки решений при управлении системой и войсками связи. Часть 2. Выработка решений при восстановлении сетей связи. – М.: ВА РВСН, 2009. 241 с.

References:

1. Sadovnichy V.A., Akaev A.A., Korotaev A.V., Malkov S.Yu. Modeling and forecasting of world dynamics. Scientific Council for the Fundamental Program. research Presidium of the Russian Academy of Sciences "Economics and Sociology of Knowledge". М.: ISPI RAS (Economics and Sociology of Knowledge), 2012;359. (In Russ)
2. Glazyev S.Yu. Economy and society/ S.Yu. Glazyev, A.V. Shchipkov. Moscow: Limited Liability Company "Prospekt", 2022; 192. (In Russ)
3. Glazyev, S.Yu. Strategy for advanced development of Russia in the context of the global crisis / S.Yu. Glazyev. Moscow: Economics, 2010; 287. (In Russ)
4. Encyclopedia of financial risk management [V.E. Barbaumov et al.]; edited by A.A. Lobanov and A.V. Chugunov. 4th ed. Moscow: Alpina Business Books, 2009; 931. (In Russ)
5. R. Sobers, "98 must-know data breach statistics for 2021" Varonis, May 2021.
6. F. Perumannil, Sabir & Haneef, "Latest trends in cybersecurity after solarwind hacking attack," Journal of Cyber Security and Mobility, 2021, 1, Jan.
7. O. Analytica, "Critical infrastructure sees rising cybersecurity risk" Emerald Expert Briefings, 2021.
8. F. Curti et al., "Cyber risk definition and classification for financial risk management" Federal Reserve Bank of Richmond, 2019.
9. Gartner, Inc., "Reviews for security threat intelligence products and services reviews and ratings" World-wide. In: Gartner peer insights. <https://www.gartner.com/reviews/market/security-threat-intelligence-services>, 2019.

10. Coulson, T., Mason, M., & Nestler, V. Cyber capability planning and the need for an expanded cybersecurity workforce. *Communications of the IIMA*: 2018; 16(2), Article 2 DOI: <https://doi.org/10.58729/1941-6687.1401>. Retrieved March 6, 2023, from <https://scholarworks.lib.csusb.edu/ciima/vol16/iss2/2/BitSight>, "Global financial firm reduces the risk of third-party breach with bitsight security ratings," BitSight Website: <https://info.bitsight.com/bitsightcase-study-global-financial-firm>, 2019.
11. Hoffmann, R., Napiórkowski, J., Protasowicki, T., & Stanik, J. Risk based approach in scope of cybersecurity threats and requirements. *Procedia Manufacturing*. 2020;44:655-662 <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.02.243>.
12. GOST R 59516–2021. Information technology. Information security management. Information security risk insurance rules. Approved and introduced put into effect by Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated May 20, 2021 N 420-st. M.: Standartinform. 2021; 20. (In Russ)
13. Kosarev A.V. Insurance of information risks: abstract of diss. ... candidate of economic sciences: 08.00.10 Financial Academy under the Government of the Russian Federation. Moscow, 2004; 23. (In Russ)
14. The Doctrine of Information Security of the Russian Federation, approved by the Decree of the President of the Russian Federation dated 05.12.2016; 646 // Consultant Plus: reference and legal system. (In Russ)
15. Federal Law "On Information, Information Technologies and Information Protection" dated 27.07.2006 N 149-FZ // SPS Consultant Plus: reference and legal system. (In Russ)
16. Voevodin V.A. Genesis of the concept of structural stability of the information infrastructure of an automated production process control system to the impact of targeted threats to information security. *Bulletin of the Voronezh Institute of the Federal Penitentiary Service Rossii*. 2023; 2:30–41. (In Russ)
17. Methodology for assessing information security threats. Methodological document of the FSTEC of Russia dated February 5, 2021 // Official website of the FSTEC of Russia [Electronic resource]. – URL: <https://fstec.ru/component/attachments/download/2919> (date of access 08.04.2021). (In Russ)
18. Vasiliev V.I., Vulfin A.M., Kirillova A.D., Kuchkarova N.V. . Methodology for assessing current threats and vulnerabilities based on cognitive modeling and Text Mining technologies. *Control, Communications and Security Systems*. 2023;3:110–134. DOI: 10.24412/2410-9916-2021-3-110 -134. (In Russ)
19. Voevodin V.A. Mathematical model for assessing the stability of functioning of an element of the information infrastructure of an automated control system exposed to information security threats. *"Information Technologies"*, 2024; 30(1): 23–31. DOI: 10.17587/it.30.23-31.
20. Voevodin V.A., Krakhotin N.A. Methods for Estimating the Connectivity of an Undirected Bipolar Labeled Graph with taking into account the destructive impact of external threats on its peaks. *Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Sciences*. 2024; 51(1):46-60. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-1-46-6046 (In Russ)
21. Voevodin V .A. Model for assessing the functional stability of information infrastructure elements under conditions of exposure to multiple computer attacks. *Computer Science and Automation*. 2023; 22(3):. 691–715. <https://DOI 10.15622/ia.22.3.8>. (In Russ)
22. Voevodin V.A., Vinogradov I.V., Volkov D.I. On the assessment of the stability of the functioning of an informatization object under computer attacks with an exponential law of distribution of time before the enemy's impact and restoration of operability. *Herald of the Daghestan State Technical University. Technical sciences*. 2022; 49(3): 39-51. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-3-39-51. (In Russ)
23. Certificate of state registration of the computer program No. 2023683185 of the Russian Federation. Program for calculating the survivability function of a graph of a two-pole structure exposed to information security threats. Certificate of state registration of the database No. 2024614666 dated. 02/28/2024. (RU). *Bulletin № 3 02/28/2024*. Voevodin V.A., Krakhotin N.A. (In Russ)
24. Khokhlachev E.N. Organization and technologies of decision-making in managing the communications system and troops. Part 2. Decision-making in restoring communications networks. M.: VA RVSН, 2009; 241. (In Russ)

Сведения об авторе:

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

Information about author:

Vladislav A. Voevodin, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Department of Information Security; va541@mail.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/ Received 13.05.2024.

Одобрена после рецензирования / Revised 10.06.2024.

Принята в печать /Accepted for publication 10.06.2024.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 532.52



DOI: 10.21822/2073-6185-2024-51-4-50-59

Оригинальная статья/Original article

Моделирование течения турбулентной жидкости

на основе решения уравнения Матье

В.В. Гарбузов, А.П. Преображенский

Воронежский институт высоких технологий,
394043, г. Воронеж, ул. Ленина, 73А, Россия

Резюме. Цель. В работе рассматривается задача моделирования течения жидкости в турбулентном режиме. Основные причины того, что возникает турбулентное течение, связаны с тем, что существуют большие скорости движения жидкостей, помимо этого могут быть препятствия или изменения в формах течений. **Метод.** Для определения характеристик течения предлагается использовать уравнение Матье. Приводятся основные этапы алгоритма расчета функций Матье, которые были использованы в ходе реализации компьютерной программы. **Результат.** При оценках собственных значений показано, что необходимо опираться на соответствующие трансцендентные уравнения. Проиллюстрировано, как происходит вычисление модифицированных функций Матье. Указано, каким образом необходимо вести расчеты в случае малого значения параметра в функциях Матье. Представлена блок-схема реализованного алгоритма моделирования турбулентности. На базе библиотеки Qt в среде Qt Creator была создана GUI оболочка, чтобы осуществлять моделирование турбулентности. При осуществлении процесса моделирования значение константы Смагоринского выбиралось равным 0.01. Для временного шага проводился выбор значения длины 0.05. В ходе реализации моделирования были использованы 2000 временных шагов. Запись для результатов моделирования осуществлялась через каждые 10 шагов. Представлены визуальным образом результаты моделирования. **Вывод.** Создана математическая модель, на основе которой существуют возможности для моделирования турбулентных сред. Математическая модель построена для различных параметров в ходе обтекания твердых тел турбулентными потоками.

Ключевые слова: моделирование, уравнение Матье, собственная функция, течение жидкости, турбулентность, алгоритм.

Для цитирования: В.В. Гарбузов, А.П. Преображенский. Моделирование течения турбулентной жидкости на основе решения уравнения Матье. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2024; 51(4):50-59. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-4-50-59

Modeling of turbulent fluid flow based on the solution of the Mathieu equation

V.V. Garbuzov, A.P. Preobrazhensky

Voronezh Institute of High Technologies,
73A Lenin St., Voronezh 394043, Russia

Abstract. Objective. This work examines the problem of fluid flow simulation in a turbulent regime. The main reasons why turbulent flow occurs are due to the existence of high velocities of movement in fluids; besides that, there may be obstacles or changes in the shapes of flows. **Method.** To determine the characteristics of a flow, it is proposed to use Mathieu's equation. The main steps of the solution algorithm are presented for Mathieu functions that were used over the course of the computer program execution. **Result.** Upon evaluating eigenvalues, it is shown that it is necessary to rely on the corresponding transcendental equations. It is illustrated how modified Mathieu functions are calculated. It is indicated how calculations should be car-

ried out in the case of a small parameter value in Mathieu functions. A block diagram of the executed turbulence modeling algorithm is presented. In order to conduct turbulence simulation, a GUI shell based on the Qt library was created in the Qt Creator environment. During the simulation process, the value of the Smagorinsky constant was chosen to be equal to 0.01. For the time step, a length value of 0.05 was selected. During the execution of the simulation, 2000 time steps were used. The simulation results were recorded every 10 steps. The results of the simulation are presented visually. **Conclusion.** A mathematical model has been created, on the basis of which there are possibilities for modeling turbulent media. The mathematical model has been constructed for various parameters during the flow of solid bodies by turbulent flows.

Keywords: simulation, Mathieu's equation, eigenfunction, fluid flow, turbulence, algorithm

For citation: V.V. Garbuzov, A.P. Preobrazhensky. Modeling of turbulent fluid flow based on the solution of the Mathieu equation. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2024; 51(4):50-59. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-4-50-59

Введение. Уравнение Матье в гидродинамике является одним из ключевых уравнений, описывающих движение жидкости или газа в турбулентных потоках. Это уравнение было впервые предложено французским физиком и математиком Пьером Симоном Лапласом в начале XIX века и названо в честь французского инженера и физика Андре Матье.

Уравнение Матье выражает закон сохранения энергии для потока жидкости и имеет вид:

$$\frac{du}{dt} + u \cdot \nabla u = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 u,$$

где u - вектор скорости потока, t - время, ρ - плотность жидкости, p - давление, ν - кинематическая вязкость, ∇ - оператор градиента.

Уравнение Матье описывает взаимодействие между инерционными силами (первое слагаемое), давлением (второе слагаемое) и вязкостью (третье слагаемое) в потоке жидкости. Оно играет важную роль в моделировании турбулентных потоков, например, при исследовании атмосферных явлений, океанографии, а также в промышленности при проектировании трубопроводов и насосов.

Постановка задачи. Использование уравнения Матье требует специализированных знаний в области гидродинамики и математической физики. Его численное решение часто осуществляется с помощью компьютерных программ и методов вычислительной гидродинамики [1, 2].

Уравнение Матье в гидродинамике, также известное как уравнение Навье-Стокса, имеет несколько формулировок в зависимости от контекста и задачи. Вот некоторые основные формулы, связанные с уравнением Матье:

1. Уравнение Навье-Стокса для инкомпрессибельной жидкости:

$$\frac{du}{dt} + (u \cdot \nabla)u = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 u$$

2. Уравнение неразрывности:

$$\nabla \cdot u = 0$$

3. Уравнение движения в цилиндрических координатах:

$$\rho \left(\frac{du_r}{dt} + u_r \frac{du_r}{dr} - \frac{u_\theta^2}{r} \right) = -\frac{dp}{dr} + \mu \left(\nabla^2 u_r - \frac{u_r}{r^2} - \frac{2}{r^2} \frac{du_\theta}{d\theta} \right)$$

$$\rho \left(\frac{du_\theta}{dt} + u_r \frac{du_\theta}{dr} + u_r \cdot \frac{u_\theta}{r} \right) = -\frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta} + \mu \left(\nabla^2 u_\theta + \frac{2}{r^2} \frac{du_r}{d\theta} - \frac{u_\theta}{r^2} \right)$$

$$\rho \left(\frac{du_z}{dt} + u_r \frac{du_z}{dr} + u_z \cdot \frac{u_r}{r} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu(\nabla^2 u_z)$$

4. Уравнение для течения Куэтта:

$$u = a \cdot (y - y^2)$$

Эти формулы представляют собой основу для описания движения жидкости или газа в турбулентных потоках и используются в гидродинамике для моделирования различных явлений. Они могут быть дополнены различными условиями на границах и начальными условиями в зависимости от конкретной задачи.

Методы исследования. Рассмотрим практически важную задачу из гидродинамики, в которой мы также можем использовать уравнение Матъе для ее решения [3]. Рассмотрим задачу о колебаниях жидкости в цилиндрической трубе.

Представим, что у нас есть цилиндрическая труба радиуса R с жидкостью внутри. Если мы создадим колебания давления на одном из концов трубы, то это приведет к возникновению стоячих волн внутри жидкости. Эти колебания могут быть описаны уравнением Матъе.

Уравнение Матъе для колебаний жидкости в цилиндрической трубе имеет вид:

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) + k^2 \psi = 0,$$

где $\psi(r)$ - функция, описывающая колебания давления в жидкости, r - радиальная координата внутри трубы, k - волновое число.

Решение этого уравнения имеет вид:

$$\psi(r) = J_0(kr) + BY_0(kr),$$

где J_0 и Y_0 - функции Бесселя первого и второго рода нулевого порядка соответственно, B - коэффициент, который определяется начальными условиями.

Для задачи о колебаниях жидкости в цилиндрической трубе можно также задать граничные условия на концах трубы, что позволит нам найти допустимые значения волнового числа k и соответствующие собственные функции $\psi(r)$, описывающие колебания давления в жидкости [4].

Обыкновенное линейное дифференциальное уравнение

$$\frac{d^2 y}{dz^2} + (p - 2q \cos(2z))y = 0 \tag{1}$$

впервые получено и исследовано Матъе. Уравнение Матъе имеет решения при любых значениях параметров q и p , причем решения уравнения (1) являются регулярными функциями переменной z , если ее величина конечна. Для исследования различных прикладных задач особое значение приобретают периодические решения уравнения (1).

Известно, что уравнение Матъе (1) может иметь следующие периодические решения, которые называются функциями Матъе.

$$\begin{aligned} {}_c C_{2m+p}(z, q) &= \sum_n A_{2n+p}^{2m+p} \cos(2n + p)z \\ {}_s C_{2m+p}(z, q) &= \sum_n A_{2n+p}^{2m+p} \sin(2n + p)z, \quad (p = 0, 1), \end{aligned} \tag{2}$$

Обсуждение результатов. В настоящей работе разработаны алгоритм и машинная программа расчета функций Матъе и их нулей.

Ниже мы рассмотрим основные этапы алгоритма расчета функций Матъе, которые были использованы нами при написании компьютерной программы. Представим, что в уравнение (1) можно осуществить подстановку любого из рядов (2). Также приравняем нулю коэффициенты при $\cos(2nz)$, $\cos((2n + 1)z)$, $\sin(2nz)$, $\sin((2n + 1)z)$ с учетом $n = 0, 1, 2, \dots$. В таких случаях приходим к рекуррентным соотношениям [3]:

$$aA_0 - qA_2 = 0;$$

$$(a - 4)A_2 - q(A_4 + 2A_0) = 0; \tag{3}$$

$$(a - 4r^2)A_{2r} - q(A_{2r+2} + A_{2r-2}) = 0;$$

$$(a - 1 - q)A_1 - qA_3 = 0;$$

$$[a - (2r + 1)^2]A_{2r+1} - q(A_{2r+3} + A_{2r-1}) = 0; \tag{4}$$

$$(a - 1 + q)B_1 - qB_3 = 0;$$

$$[a - (2r + 1)^2]B_{2r+1} - q(B_{2r+3} + B_{2r-1}) = 0; \tag{5}$$

$$(a - 4)B_2 - qB_4 = 0;$$

$$(a - 4r^2)B_{2r} - q(B_{2r+2} + B_{2r-2}) = 0. \tag{6}$$

Для определения коэффициентов разложения $A_{2r}, A_{2r+1}, B_{2r}, B_{2r+1}$ в (2) используются условия нормировки [5]

$$2[A_0]^2 + \sum_{r=1}^{\infty} [A_{2r}]^2 = 1,$$

$$\sum_{r=0}^{\infty} [A_{2r+1}]^2 = 1,$$

$$\sum_{r=0}^{\infty} [B_{2r+1}]^2 = 1, \tag{7}$$

$$\sum_{r=0}^{\infty} [B_{2r+2}]^2 = 1.$$

Собственные значения, при которых уравнение (1) имеет решения ${}_c C_{2m}(z, q)$, обычно обозначаются $a_{2m}(q)$.

Для расчета собственных значений $a_{2m}(q)$ [6, 7] удобно воспользоваться трансцендентными уравнениями, соответствующими ветвям $p_{2m}(q) = p_{2m}(q)$ кривой $p = p(q)$

$$a_0 = \frac{-2q^2}{4 - a_0 - \frac{q^2}{16 - a_0 - \frac{q^2}{36 - a_0 - \dots - \frac{q^2}{4k^2 - a_0 - \dots}}};$$

$$a_2 = 4 + \frac{2q^2}{a_2 - \frac{q^2}{16 - a_2 - \frac{q^2}{36 - a_2 - \frac{q^2}{64 - a_2 - \dots - \frac{q^2}{4k^2 - a_2 - \dots}}};$$

$$a_{2m} = (2m)^2 + \frac{q^2}{a_{2m} - (2m-2)^2 - \frac{q^2}{a_{2m} - (2m-4)^2 - \dots - \frac{q^2}{a_{2m} - 4 - \frac{2q^2}{a_{2m}}}}$$

$$\frac{q^2}{(2m+2)^2 - a_{2m} - \frac{q^2}{(2m+4)^2 - a_{2m} - \dots - \frac{q^2}{(2m+2k)^2 - a_{2m} - \dots}} \quad (8)$$

Выше рассматривалась функция Матье с четным индексом ${}_s C_{2m}(z, q)$.

По аналогии можно найти условия существования решений вида ${}_c C_{2m+1}(z, q)$, ${}_s C_{2m+1}(z, q)$, ${}_s C_{2m+2}(z, q)$ и собственные значения $a_{2m+1}(q)$, $b_{2m+2}(q)$, $b_{2m+1}(q)$.

Трансцендентные уравнения, которые относятся к собственным значениям уравнения Матье $a_{2m+1}(q)$, $b_{2m+2}(q)$, $b_{2m+1}(q)$ имеют следующий вид [8].

$$a_1 = 1 + q - \frac{q^2}{9 - a_1 - \frac{q^2}{25 - a_1 - \frac{q^2}{49 - a_1 - \dots - \frac{q^2}{(2k+1)^2 - a_1 - \dots}}};$$

$$a_{2m+1} = (2m+1)^2 + \frac{q^2}{a_{2m+1} - (2m-1)^2 - \frac{q^2}{a_{2m+1} - (2m-3)^2 - \dots - \frac{q^2}{a_{2m+1} - 1 - q}} \quad (9)$$

$$\frac{q^2}{(2m+3)^2 - a_{2m+1} - \frac{q^2}{(2m+5)^2 - a_{2m+1} - \dots - \frac{q^2}{(2m+2k+1)^2 - a_{2m+1} - \dots}};$$

$$b_2 = 4 - \frac{q^2}{16 - b_2 - \frac{q^2}{36 - b_2 - \frac{q^2}{64 - b_2 - \dots - \frac{q^2}{(2k+2)^2 - b_2 - \dots}}};$$

$$b_{2m+2} = (2m+2)^2 + \frac{q^2}{b_{2m+2} - (2n)^2 - \frac{q^2}{b_{2m} - (2m-2)^2 - \dots - \frac{q^2}{b_{2m+2} - 4}} \quad (10)$$

$$\begin{aligned}
 & \frac{q^2}{(2m+4)^2 - b_{2m+2} - \frac{q^2}{(2m+6)^2 - b_{2m+2} - \dots - \frac{q^2}{(2m+2k+2)^2 - b_{2m+2} - \dots}}; \\
 & b_1 = 1 - q - \frac{q^2}{9 - b_1 - \frac{q^2}{25 - b_1 - \frac{q^2}{49 - b_1 - \dots - \frac{q^2}{(2k+1)^2 - b_1 - \dots}}}}; \\
 & b_{2m+1} = (2m+1)^2 + \frac{q^2}{b_{2m+1} - (2m-1)^2 - \frac{q^2}{b_{2m+1} - (2m-3)^2 - \dots - \frac{q^2}{b_{2m+1} - 1 + q}} - \dots} \quad (11) \\
 & \frac{q^2}{(2m+3)^2 - b_{2m+1} - \frac{q^2}{(2m+5)^2 - b_{2m+1} - \dots - \frac{q^2}{(2m+2k+1)^2 - b_{2m+1} - \dots}}
 \end{aligned}$$

При оценках модифицированных функций Матье можно применять выражения

$$\begin{aligned}
 {}_c C e_{2m+p}(z, q) &= \sum_n A_{2n+p}^{2m+p} ch(2n+p)z = {}_c C_{2m+p}(jz, q) \\
 {}_s C e_{2m+p}(z, q) &= \sum_n A_{2n+p}^{2m+p} sh(2n+p)z = -j {}_s C_{2m+p}(jz, q), (p=0,1). \quad (12)
 \end{aligned}$$

При реализации разложения функции ${}_c C_0(z, q)$, чтобы определить коэффициент A_0 , можно опираться на выражения [1]

$$\begin{aligned}
 V_0 &= (a-4)/4 = A_2 / A_0; \\
 -V_{2r-2} &= [q/4r^2] / [1 - (1/4r^2)(a - qV_{2r})], \text{ при } r \geq 2, \quad (13)
 \end{aligned}$$

$$A_0 = \frac{1}{\sqrt{2 + (V_0)^2 + (V_2)^2 + (V_4)^2 + \dots}} \quad (14)$$

тогда

По другим функциям Матье, чтобы вычислять коэффициенты в разложении, можно использовать выражения [1]

$$\begin{aligned}
 V_1 &= (a-1-q)/q = A_3 / A_1; \\
 -V_{2r-1} &= [q/(2r+1)^2] / [1 - a/(2r+1)^2 + qV_{2r+1}/(2r+1)^2] \quad (r \geq 2); \quad (15)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 V_1 &= (a-1+q)/q = B_3 / B_1; \\
 -V_{2r-1} &= [q/(2r+1)^2] / [1 - a/(2r+1)^2 + qV_{2r+1}/(2r+1)^2] \quad (r \geq 2); \quad (16)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 V_2 &= (a-4)/q = B_4 / B_2; \\
 -V_{2r-2} &= [q/4r^2] / [1 - a/4r^2 + qV_{2r}/4r^2] \quad (r \geq 3). \quad (17)
 \end{aligned}$$

При расчете функций Матье, если есть малые значения в параметре q ($q < 1$) можно опираться на разложения по такому параметру.

$$\begin{aligned}
 {}_c C_0(z, q) &= 2^{-1/2} \left[1 - \frac{q}{2} \cos(2z) + q^2 \left(\frac{\cos(4z)}{32} - \frac{1}{16} \right) - q^3 \left(\frac{\cos(6z)}{1152} - \frac{11 \cos(2z)}{128} \right) + \dots \right] \\
 {}_c C_1(z, q) &= \cos(z) - \frac{q}{8} \cos(3z) + q^2 \left(\frac{\cos(5z)}{192} - \frac{\cos(3z)}{64} - \frac{\cos(z)}{128} \right) - \\
 &\quad - q^3 \left(\frac{\cos(7z)}{9216} - \frac{\cos(5z)}{1152} - \frac{\cos(3z)}{3072} + \frac{\cos(z)}{512} \right) + \dots \\
 {}_c C_2(z, q) &= \cos(2z) - q \left(\frac{\cos(4z)}{12} - \frac{1}{4} \right) + q^2 \left(\frac{\cos(6z)}{384} - \frac{19 \cos(2z)}{288} \right) + \dots, \quad (18) \\
 {}_s C_1(z, q) &= \sin(z) - \frac{q}{8} \sin(3z) + q^2 \left(\frac{\sin(5z)}{192} + \frac{\sin(3z)}{64} - \frac{\sin(z)}{128} \right) - \\
 &\quad - q^3 \left(\frac{\sin(7z)}{9216} + \frac{\sin(5z)}{1152} - \frac{\sin(3z)}{3072} - \frac{\sin(z)}{512} \right) + \dots, \\
 \left. \begin{aligned}
 {}_c C_r(z, q) \\
 {}_s C_r(z, q)
 \end{aligned} \right\} &= \cos(rz - p\pi/2) - q \left\{ \frac{\cos[(r+2)z - p\pi/2]}{4(r+1)} - \frac{\cos[(r-2)z - p\pi/2]}{4(r-1)} \right\} + \\
 &+ q^2 \left\{ \frac{\cos[(r+4)z - p\pi/2]}{32(r+1)(r+2)} + \frac{\cos[(r-4)z - p\pi/2]}{32(r-1)(r-2)} - \frac{\cos[rz - p\pi/2]}{32} \left[\frac{2(r^2+1)}{(r^2-1)^2} \right] \right\} + \dots,
 \end{aligned}$$

тогда можно дать оценку при $p = 0$ для ${}_c C_r(z, q)$, при $p = 1$ для рассматриваемого ${}_s C_r(z, q)$ ($r \geq 3$).

То есть, для собственных функций были рассмотрены основные этапы их определения. Алгоритм моделирования турбулентности моделью Смагоринского был реализован в виде кроссплатформенной динамической библиотеки под Windows и Linux.

Написание программы велось в среде компилятора GCC с использованием для компиляции Makefile. Скрипты Makefile автоматически составляют список исходных файлов, входящих в каждый модуль подсистемы.

Для обеспечения расширяемости каждый функциональный модуль библиотеки компилируется в статическую библиотеку. В финале все статические библиотеки интегрируются в одну динамическую. В ходе разработки использовались следующие библиотеки: Alglib, boost и GSL. Для демонстрации работы и отладки с помощью библиотеки Qt в среде Qt Creator была создана GUI оболочка для библиотеки моделирования турбулентности. Скриншот окна оболочки представлен на рис 1.

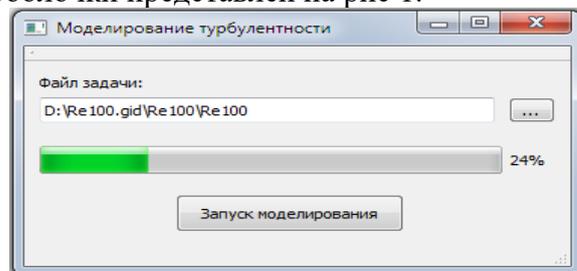


Рис. 1. GUI оболочка над библиотекой подсистемы моделирования турбулентности
 Fig. 1. GUI shell over the turbulence modeling subsystem library

На рис. 2 показана блок-схема реализованного алгоритма моделирования турбулентности.

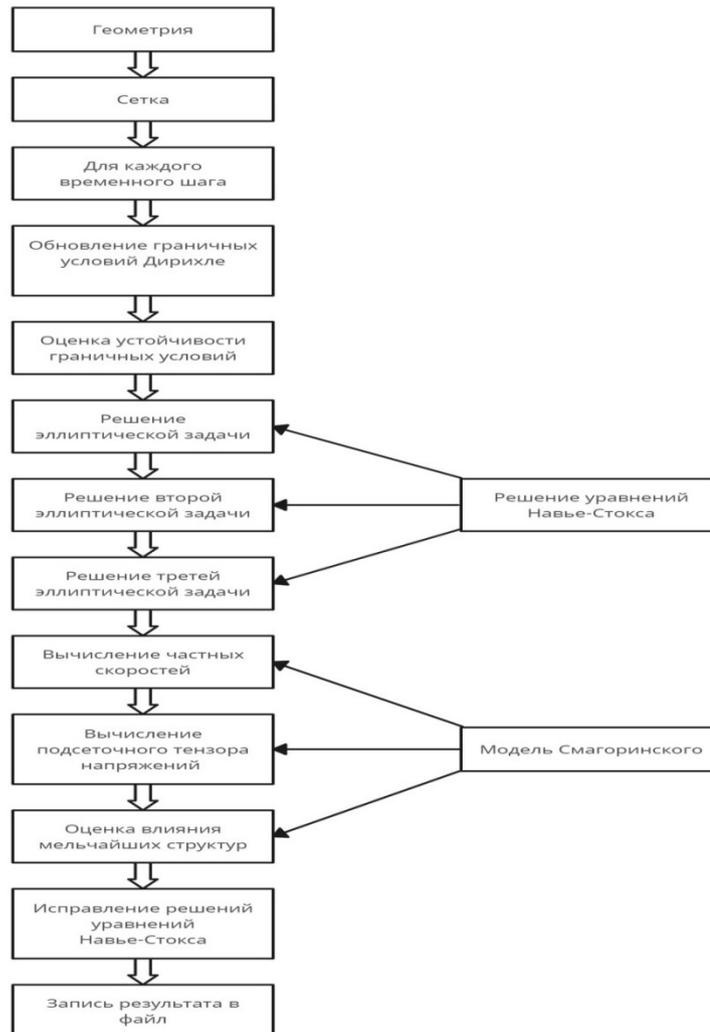


Рис. 2. Блок-схема алгоритма моделирования турбулентности

Fig. 2. Block diagram of the turbulence modeling algorithm

Создадим в программной среде простейшую геометрию в GID – обтекание водой круглого препятствия:

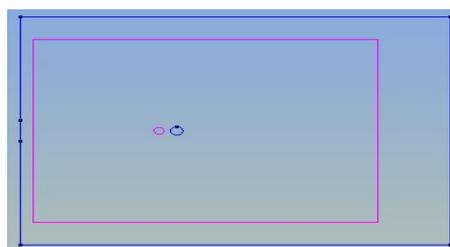


Рис. 3. Демонстрация геометрии задачи

Fig. 3. Demonstration of the problem geometry

Затем сетка, в которой размеры элементов равнялись 0.5, была сформирована с использованием соответствующей геометрии

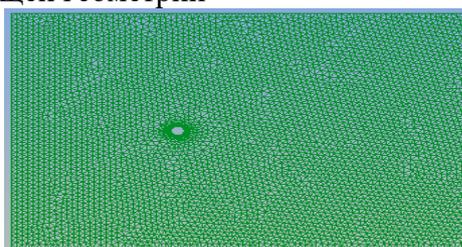


Рис. 4. Пример представления сетки на базе геометрии

Fig. 4. Example of mesh representation based on geometry

Пусть число Рейнольдса равнялось 100. Было осуществлено моделирование. Его результаты представлены ниже для случая, когда вода турбулентным образом будет обтекать препятствия. Значение константы Смагоринского в ходе моделирования выбиралось равным 0.01. Временной шаг имел значение длины 0.05. Процесс моделирования осуществлялся в течение 2000 временных шагов. При этом через каждые 10 шагов велась запись результатов моделирования.

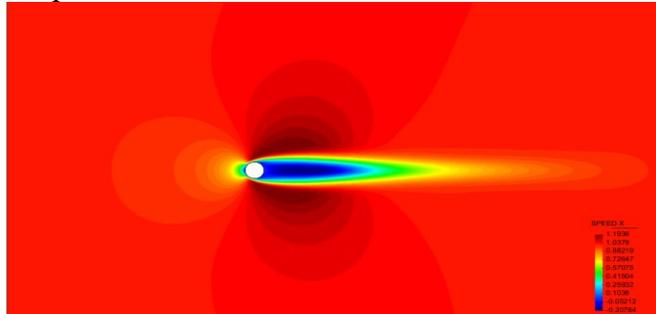


Рис. 5. Моделирование для шага 40
Fig. 5. Simulation for step 40

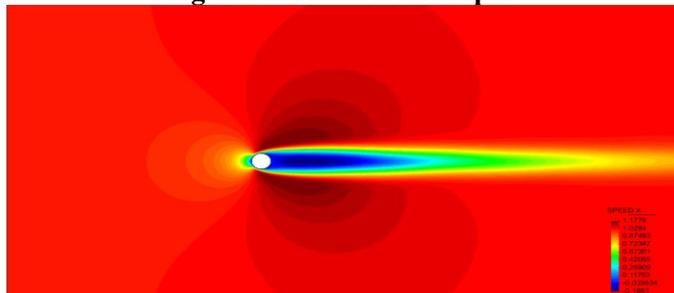


Рис. 6. Моделирование для шага 80
Fig. 6. Simulation for step 80

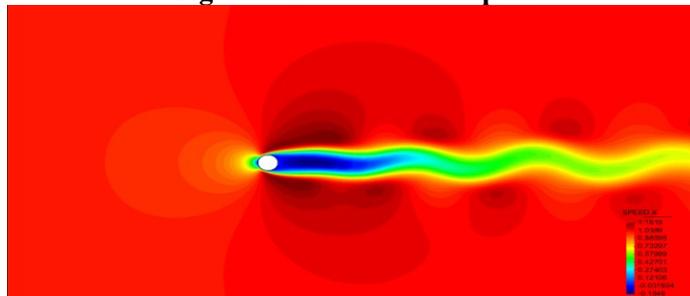


Рис. 7. Моделирование для шага 140
Fig. 7. Simulation for step 140

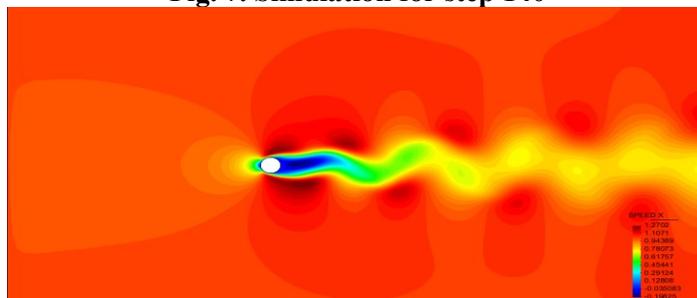


Рис. 8. Моделирование для шага 200
Fig. 8. Simulation for step 200

Вывод. Таким образом, в работе была создана математическая модель, на основе которой существуют возможности для моделирования турбулентных сред.

Модель была реализована в программном продукте. Были осуществлены процессы моделирования для различных параметров в ходе обтекания различных твердых тел турбулентными потоками.

Библиографический список:

1. Бреховских Л. М. Введение в механику сплошных сред / Бреховских Л. М., Гончаров В. В.; – Москва: 1982. – 335 с.
2. Левин В.Г. Физико-химическая гидродинамика / Левин В.Г.; Изд. 2-е, доп. и перераб. – Москва: ГИФМЛ, 1959. – 700 с.
3. Ландау Л. Д. Гидродинамика / Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.; – Москва, 1986. – 736с.
4. Бреннер Г. Гидродинамика при малых числах Рейнольдса / Бреннер Г., Хаппепь Дж.; – Москва: Мир, 1976. – 650 с.
5. Нахушева В.А. Дифференциальные уравнения математических моделей нелокальных процессов / Нахушева В.А. – Москва: Наука, 2006. - 173 с.
6. Трикоми Ф. Интегральные уравнения. – Москва: Изд-во иностранной литературы, 1960. – 300 с.
7. Дещеревский А.В. Вариации геофизических полей как проявления детерминированного хаоса во фрактальной среде / Дещеревский А.В., Сидорин А.Я., Сидорин И.А., Лукк А.А.; – Москва: ОИФЗ РАН, 1996. – 210 с.
8. Беданокова, С. Ю. Математическое моделирование водного и солевого режимов в почвах с фрактальных организаций: Автореферат на соискание кандидата физико-математических наук / Беданокова, С. Ю.; – Таганрог, 2007. – 16 с.
9. Зайцев М.Л. Явное представление сокращенных в размерности уравнений Эйлера и Навье - Стокса несжимаемой жидкости в интегральной форме / Зайцев М.Л., Аккерман В.Б.; – Волгоград: // Математическая физика и компьютерное моделирование. – 2021. – 20 с.
10. Зайцев М.Л. Явное представление сокращенных в размерности уравнений Эйлера сжимаемой жидкости и полной системы уравнений гидродинамики в интегральной форме / Зайцев М.Л., Аккерман В.Б.; – Волгоград: // Математическая физика и компьютерное моделирование. – 2023. – 22 с.

References:

1. Brekhovskikh L. M. Introduction to Continuum Mechanics. Brekhovskikh L. M., Goncharov V. V.; Moscow: 1982; 335 (In Russ)
2. Levin V.G. Physicochemical Hydrodynamics 2nd ed., suppl. and rev. Moscow: GIFML, 1959; 700 (In Russ)
3. Landau L. D. Hydrodynamics / Landau L. D., Lifgits E. M.; Moscow, 1986;736 (In Russ)
4. Brenner G. Hydrodynamics at Low Reynolds Numbers / Brenner G., Happen J.; Moscow: Mir, 1976; 650 (In Russ)
5. Nakhusheva V. A. Differential equations of mathematical models of nonlocal processes / Nakhusheva V.A. - Moscow: Nauka, 2006;173 (In Russ)
6. Tricomi F. Integral equations. Moscow: Publishing house of foreign literature, 1960; 300 (In Russ)
7. Deshcherevsky A.V. Variations of geophysical fields as manifestations of deterministic chaos in a fractal environment / Deshcherevsky A.V., Sidorin A.Ya., Sidorin I.A., Lukk A.A.; Moscow: OIFZ RAS, 1996; 210 (In Russ).
8. Bedanokova S. Yu. Mathematical modeling of water and salt regimes in soils with fractal organizations: Abstract for a candidate of physical and mathematical sciences.; Taganrog, 2007;16 (In Russ)
9. Zaitsev M.L. Explicit representation of the dimensionally reduced Euler and Navier-Stokes equations of an incompressible fluid in integral form / Zaitsev M.L., Akkerman V.B.; Volgograd: // Mathematical physics and computer modeling. 2021; 20 (In Russ).
10. Zaitsev M.L. Explicit representation of the dimensionally reduced Euler equations of a compressible fluid and the complete system of hydrodynamic equations in integral form / Zaitsev M.L., Akkerman V.B. Volgograd: *Mathematical physics and computer modeling*. 2023; 2 (In Russ)

Сведения об авторах:

Гарбузов Владислав Владимирович, преподаватель математики, 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, Mathematics teacher, 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 24.05.2024.

Одобрена после рецензирования/ Revised 09.07.2024.

Принята в печать/Accepted for publication 30.10.2024.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 005.5

DOI: 10.21822/2073-6185-2024-51-4-60-70



Оригинальная статья/Original article

Модель автоматизации процессов управления вузом

М.И. Грачев

Санкт-Петербургский университет МВД России,
198206, г. Санкт-Петербург, ул. Летчика Пилютова, 1, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является синтез модели решения образовательной организации направленной на автоматизацию процессов управления вузом. Повышение эффективности процессов управления основано на получаемом в работе показателе эффективности реализации решения. **Метод.** Описан процесс синтеза математической модели, позволяющей построить граф состояний системы и применить дифференциальные уравнения Колмогорова-Чепмена, как итог показателя эффективности реализации решения руководителя вуза. При проведении процессов декомпозиции, абстрагирования и агрегирования получаем математическую модель управленческого решения. Рассматривая процесс решения задачи по управлению в четырех состояниях системы получаем дифференциальные уравнения Колмогорова-Чепмена. Задавая нормировочное уравнение и применяя метод Гаусса переводим получаемые дифференциальные уравнения в линейные алгебраические уравнения и находим показатель эффективности реализации решения руководителя вуза. Для достижения автоматизации с требуемым показателем эффективности реализации решения необходимо получить временные состояния рассматриваемой системы. **Результат.** Связывая полученный показатель с временными состояниями системы, получаем эффективность реализации решения действующей системы. В последующем, путем решения обратной задачи, получаем требуемые характеристики, необходимые для автоматизации процессов управления вузом. **Вывод.** Задавая требуемый показатель эффективности реализации решения, определены необходимые характеристики к рассматриваемой системе, которыми должны располагать процессы управления для их дальнейшей автоматизации. Имея такие характеристики можно предъявлять требования к программно-аппаратному комплексу и кадровому составу вуза.

Ключевые слова: модель управления, показатель эффективности, автоматизация, образовательная организация, процессы управления, техническое оснащение, кадровый состав

Для цитирования: М.И. Грачев. Модель автоматизации процессов управления вузом. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2024; 51(4):60-70. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-4-60-70

The model of automation of university management processes

M.I. Grachev

Saint Petersburg University of the Ministry of Internal Affairs of Russia,
1 Pilyutov Pilot St., St. Petersburg 1198206, Russia

Abstract. Objective. The purpose of the research is to synthesize a solution model of an educational organization aimed at automating university management processes. Improving the efficiency of management processes is based on the indicator of the effectiveness of the solution implementation obtained in the work. **Method.** The process of synthesis of a mathematical model is described, which allows to build a graph of the states of the system and apply the Kolmogorov-Chapman differential equations, as a result, to obtain an indicator of the effectiveness of the implementation of the decision of the head of the university. When carrying out the processes of

decomposition, abstraction and aggregation, we obtain a mathematical model of a management decision. Considering the process of solving the control problem in four states of the system, we obtain the Kolmogorov-Chapman differential equations. By setting the normalization equation and applying the Gauss method, we translate the resulting differential equations into linear algebraic equations and find an indicator of the effectiveness of implementing the decision of the head of the university. To achieve automation with the required performance indicator of the solution implementation, it is necessary to obtain the temporary states of the system in question. **Result.** By linking the obtained indicator with the temporary states of the system, we obtain the effectiveness of implementing the solution of the current system. Subsequently, by solving the inverse problem, obtain the required characteristics necessary for the automation of university management processes. **Conclusion.** By setting the required performance indicator for the implementation of the solution, we obtain the necessary characteristics for the system in question, which the management processes should have for their further automation. Having the required characteristics, we can make demands on the software and hardware complex and the staff of the university.

Keywords: management model, efficiency indicator, automation, educational organization, management processes, technical equipment, personnel.

For citation: M.I. Grachev. The model of automation of university management processes. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2024;51(4):60-70. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-4-60-70

Введение. В настоящее время вопросы диссертационных исследований, проводимых в рамках автоматизации, рассматриваются как проведение анализа исследуемой системы в дальнейшем для решения прямой задачи и выработки необходимых характеристик для их применения [1-10].

Авторы диссертационных исследований: А.В. Козлова [1], А.П. Чугунов [2], М.В. Деев [3], Г.С. Боровкова [4], А.А. Сиделев, [5], К.В. Логинов [6], А.Н. Полетайкин [7], А.А. Овчинников [18], Е.А. Цвелик [9], Д.А. Стаин [10] раскрывают различные подходы к решению задачи по автоматизации рассматриваемой системы, но решение обратной задачи, как и синтез модели решения не рассматривается. В диссертационном исследовании А.В. Козловой повышение эффективности производственного процесса технического контроля изделий основывается на методе аналитического подхода с использованием цифровой системы обработки данных [1]. В диссертационном исследовании А.П. Чугунова рассмотрена научная задача по созданию системы по поддержке принятия решений при управлении сетевыми образовательными программами вуза [2]. В диссертационном исследовании Г.С. Боровковой рассмотрены методы, и алгоритмы управления образовательным учреждением высшего образования с помощью рейтинговой системы, по результатам которой формируются управляющие мероприятия, способствующие повышению эффективности работы профессорско-преподавательского состава [4]. В работе А.Н. Полетайкина решается проблема регуляризации образовательной деятельности за счет применения гибридного математического моделирования, а также рассматривается подход к повышению качества образования [7]. В диссертационном исследовании А.А. Овчинникова применен комплексный подход, позволяющий эффективное управление образовательными системами. Соответственно, рассматриваемые системы состоят из кадрового состава и программно-аппаратной составляющей. В совокупности данные рассматриваемые системы представляют собой человеко-машинные системы (ЧМС). ЧМС представляет собой взаимосвязанную структуру в организации, так как операторы на местах за счет применения технических средств в виде компьютерной техники и программного обеспечения установленного на нем позволяют проводить анализ текущего состояния процессов управления. Под техническими средствами применяемыми в исследуемой системе понимаются компьютеры, технические средства контроля доступа, камеры видеонаблюдения, серверное оборудование и прочие элементы. Под программными средствами понимаются

программы, установленные на технических средствах позволяющие проводить взаимодействие человека (оператора) и технического устройства. Для различных технических средств применяются различные программное обеспечение, которое организация может себе позволить исходя из его стоимости, а в некоторых случаях исходя из его разрешения в применении. Для проведения автоматизации процессов управления в организации существуют технические подразделения, кадровые подразделения, отделения делопроизводства, непосредственно влияющие на процесс управленческих решений через своевременное информирование руководителя о проблемных вопросах требующих немедленного разрешения. Проблемными вопросами могут быть, например: поступление для исполнения срочного документа, срыв выполнения плана на производстве, высокая «текучка» кадров и т.д. Тем не менее, замкнутый контур управления организацией состоящей из технических средств и кадрового состава образует ЧМС. У руководителя данной системы как у лица, принимающего решение должна быть модель позволяющая справляться с возникающими проблемами в системе управления, но вопрос влияния кадрового состава в этой модели в литературе рассматривался со стороны анализа, а не синтеза. Синтез модели управленческого решения позволяет задавать требуемые характеристики исследуемой системы, решать обратную задачу и тем самым получать требуемый результат. Данная постановка вопроса определяет актуальность проводимого исследования.

Постановка задачи. Определение параметров необходимых для решения руководителем возникающей проблемы в исследуемой системе становится важной задачей. Кадровый состав в ЧМС будет определять важную роль в решении возникающих проблем. В публикуемой литературе рассматриваются различные подходы, направленные на автоматизацию управляемой системы [11-18].

Авторы публикаций: В.А. Гончаренко [11], А.А. Гребенщикова [12], Е.С. Дашкова [13], А.В. Енгибарян [14], Ю.А. Зуева, [15], И.В. Калущкий [16], Д.Г. Маркова [17], И.П. Скворцов [18] рассматривают в своих работах влияние кадрового состава на различные процессы. Как отмечает А. А. Гребенщикова, что влияние ЧФ может привести к возрастанию рисков на предприятии, но многое зависит от полученных компетенций, проведение работы по прогнозированию и необходимости создания модели позволяющей решать возникающие трудности по преодолению риска [12]. В работе Е.С. Дашковой своевременное принятие и реализация управленческих решений являются важным фактором для успешного функционирования организации [13]. Ю.А. Зуева в своей работе пишет о важности своевременного решения задачи по возникающим затруднениям в работе организации, но и выделяет важность харизматических черт личности [15]. Со стороны обеспечения информационной безопасности И.В. Калущкий пишет в своей работе [16], что человек может представлять проблему при выполнении различных задач, в том числе и при обеспечении информационной безопасности.

Проблематике ЧФ в информационной безопасности, рассмотрение вопросов по проблеме влияния человека на происходящие трудности в работе указывает в своей работе Д.Г. Маркова [17]. В статье А. В. Еркина приводится интересный анализ и разграничение возникающих проблем происходящих в организации: 25% из-за ЧФ и 75% из-за программно-аппаратного обеспечения [19], необходимо отметить важность данного разграничения, так как в настоящее время этот разрыв увеличивается в сторону техники. Соответственно необходимо рассматривать процесс автоматизации как взаимное влияние ЧФ и программно-аппаратного комплекса. Вопрос автоматизации в публикуемой литературе и диссертационных исследованиях [20-30] в основном основан на повышении эффективности рассматриваемой ими системы и за счет методов анализа и дальнейшего подбора и/или перебора программно-аппаратного комплекса с целью достижения требуемого результата. Данная постановка вопроса не всегда позволяет достигать требуемый результат, а лишь стремится к его достижению. В данной работе мы будем решать обратную задачу, позволяющую достичь требуемый показатель эффективности реализации управ-

ленческого решения и увидеть влияние ЧФ на модель принимаемых управленческих решений.

Методы исследования. В статье применяется метод синтеза модели управленческого решения, позволяющей формировать требуемые характеристики исследуемой системы. Проводимое исследование можно схематично представить на рис. 1.

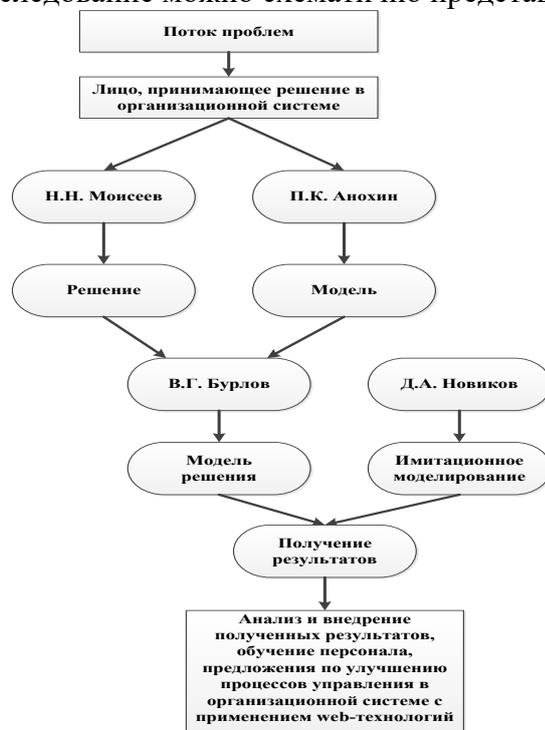


Рис. 1. Схема проводимого исследования
Fig. 1. Scheme of the conducted research

Метод и методология исследования строится на работах академиков Н.Н. Моисеева [31], П.К. Анохина [32] и работами профессора В.Г. Бурлова [33-35]. Академик Н.Н. Моисеев утверждал, что человек принимает решение на возникающий поток проблем, а академик П.К. Анохин утверждал, что человек мыслит на основе модели. Профессор В.Г. Бурлов объединил работы академиков в виде закона сохранения целостности объекта.

Академик Д.А. Новиков в своих работах утверждает, что после построения модели исследуемой системы можно провести имитационное моделирование для получения результатов и анализа работы созданной системы [36]. Соответственно, необходимо синтезировать модель решения, так как подход на основе анализа не дает требуемого результата и обладает концептуальной неполнотой В.В. Дружинина, Д.С. Конторова, М.Д. Конторова [37]. Лицо, принимающее решение (ЛПР) в организации будет проводить комплекс мероприятий направленных на противодействие проблемам, возникающим в процессах управления, рис. 2.

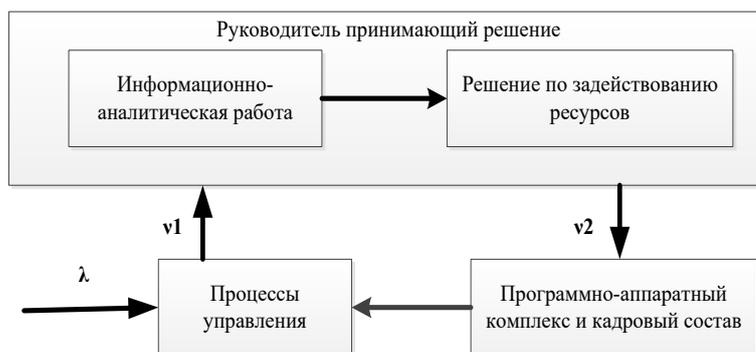


Рис. 2. Процессы принятия решения
Fig. 2. Decision-making processes

В процессах управления лицо принимающее решение получает сообщение о возникающей проблеме в системе, ведет информационно-аналитическую работу по выработке решения по задействованию ресурсов для разрешения этой проблемы. Разрешение проблемы возможно за счет имеющейся взаимозависимой ЧМС.

Обсуждение результатов. В результате исследования выявлена обратная зависимость между средним временем проявления проблемы и λ потоком проблем возникающих в системе, средним временем идентификации проблемы и интенсивности v_1 , средним временем нейтрализации проблемы и интенсивности v_2 (1).

$$\lambda=1/\Delta t_{пп}, v_1=1/\Delta t_{ип}, v_2=1/\Delta t_{нп} \quad (1)$$

Для синтеза модели управленческого решения ЛПР применим методы декомпозиции, абстрагирования и агрегирования, рис. 3. Рассматривая управленческое решение необходимо провести декомпозицию управленческого решения от обстановки, информационно-аналитической работы и решения (реализация предназначения объекта управления).

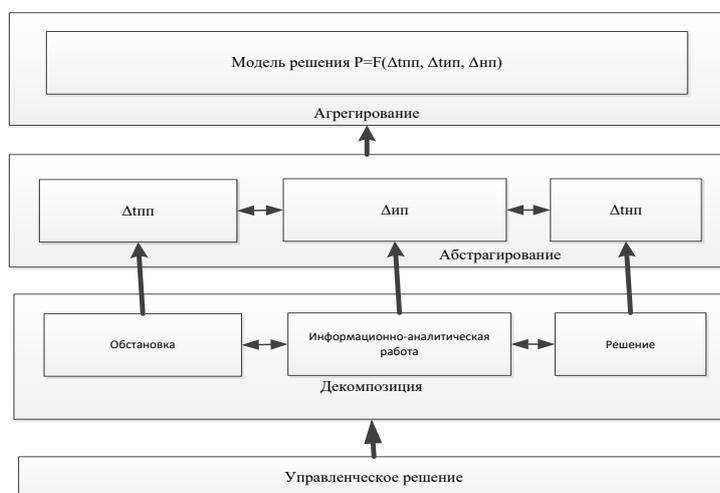


Рис. 3. Синтез модели управленческого решения

Fig. 3. Synthesis of the management decision model

Мы получили модель управленческого решения в виде трех базовых компонентов (2):

$$P = F (\Delta t_{пп}, \Delta t_{ип}, \Delta t_{нп}) \quad (2)$$

Где $\Delta t_{пп}$ – среднее время проявления проблемы;

$\Delta t_{ип}$ – среднее время идентификации проблемы;

$\Delta t_{нп}$ – среднее время нейтрализации проблемы;

P – показатель эффективности реализации решения.

Временные диапазоны проявления проблемы, идентификации проблемы и нейтрализации проблемы необходимо представить в следующем виде, рис. 4.

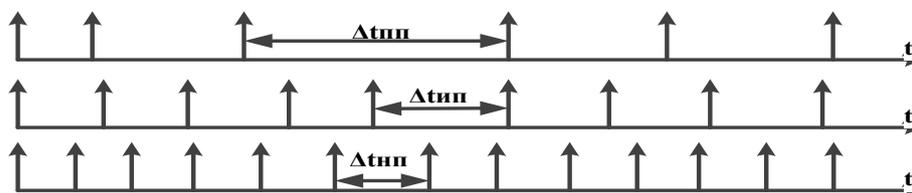


Рис. 4. Синтез модели управленческого решения

Fig. 4. Synthesis of the management decision model

Для ЛПР решение задачи по повышению эффективности реализации решения становится главной задачей. Её реализация может быть осуществлена через имеющийся программно-аппаратный комплекс в рассматриваемой системе и влиянием кадрового состава входящим в систему. Соответственно у нас получается зависимая ЧМС. При проведении исследования для синтеза модели управленческого решения мы строим граф состояний исследуемой системы, рис. 5.

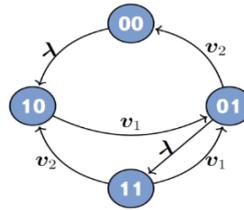


Рис. 5. Состояния системы
Fig. 5. System states

Исследуемая система состоит из 4 состояний:

1. 00 (P_{00}) - штатная работа вуза (не идентифицирует и не нейтрализует);
2. 10 (P_{10}) - состояние работы вуза, при котором (идентифицирует, но не нейтрализует);
3. 01 (P_{01}) - состояние работы вуза, при котором (не идентифицирует, но нейтрализует);
4. 11 (P_{11}) - состояние работы вуза, при котором происходит и идентификация и нейтрализация.

К исследуемой системе мы можем применить систему дифференциальных уравнений Колмогорова и представить граф состояний в следующем виде (3):

$$P_{00} = \frac{v_1 v_2}{\lambda(\lambda + v_1 + v_2) + v_1 v_2}$$

$$P_{10} = \frac{\lambda v_2 (\lambda + v_1 + v_2)}{(v_1 + v_2) [\lambda(\lambda + v_1 + v_2) + v_1 v_2]}$$

$$P_{01} = \frac{v_1 \lambda}{\lambda(\lambda + v_1 + v_2) + v_1 v_2}, \quad (3)$$

$$P_{11} = \frac{\lambda v_1}{(v_1 + v_2) [\lambda(\lambda + v_1 + v_2) + v_1 v_2]}$$

Соответственно, состояние P_{00} при котором система не автоматизирована, будет являться показателем эффективности реализации решения, что позволяет ввести нормировочное уравнение, при котором сумма всех состояний системы будет равна нулю и перейти из дифференциальных уравнений к линейным алгебраическим уравнениям, решение которых осуществляется методом Крамера или Гауса [38]. Для связи полученного показателя эффективности реализации решения руководителя с временными состояниями системы применим сетевые графики, рис. 6.

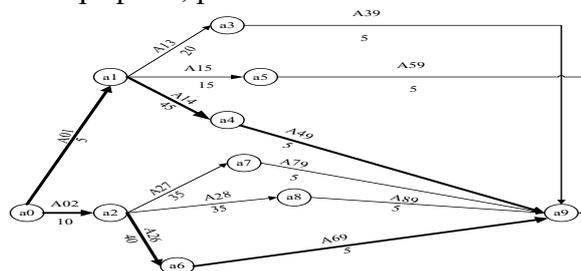


Рис. 6. Пример сетевого графика
Fig. 6. Example of a network graph

На рис. 6 в виде обозначений a_0, a_1, \dots, a_n – приводятся запланированные события, в виде $A_{0-1}, A_{1-2}, \dots, A_{9-n}$ – приводятся запланированные работы. Номера под стрелками указывают на количество единиц затрачиваемого времени. Стрелки более темного цвета указывают на наиболее долгий процесс выполнения ЛПР выполняемой задачи. На основе этих критических путей строится работа ЛПР по их оптимизации. Такие сетевые графики строят для определения времени идентификации возникающих проблем в системе управления, времени нейтрализации возникающих проблем в системе управления и времени возникновения проблемы в системе. Получив время проявления проблемы, время иденти-

фикации проблемы и время нейтрализации проблемы по трем составленным сетевым графикам мы связываем временные состояния критических путей с полученной моделью, что наглядно позволяет получить эффективность функционирования системы в настоящее время. Если мы определяем, что показатель эффективности реализации решения ниже заданного параметра мы можем решить обратную задачу и получить требуемые характеристики для работы рассматриваемой системы.

Затрачиваемое время путем подсчета и определяют самые длинные (критические) пути. Получив время проявления проблемы, время идентификации проблемы и время нейтрализации проблемы по трем составленным сетевым графикам мы связываем полученную математическую модель с временными состояниями системы. Как показывает практика прогнозирование является важным элементом в автоматизации процессов управления и решения требуемых задач для предотвращения их срыва при возникновении проблемы. Если представить показатель эффективности реализации решения как функцию зависимости от x, y, z $P=f(x; y; z)$, то можно построить трехмерный график, рис. 7:

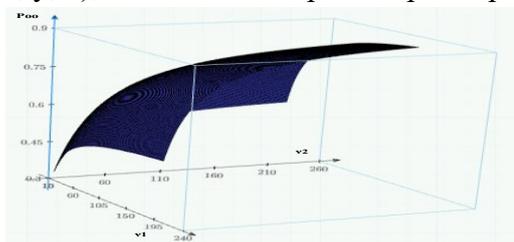


Рис. 7. Трехмерный график зависимости показателя эффективности реализации решения от интенсивностей

Fig. 7. Three-dimensional graph of the dependence of the efficiency indicator of the solution implementation on the intensities

где x – коэффициент, показывающий во сколько раз необходимо увеличить интенсивность v_1 для достижения требуемого уровня показателя эффективности реализации решения по идентификации возникающей проблемы в процессах управления вузом; y – коэффициент, показывающий во сколько раз необходимо увеличить интенсивность v_2 для достижения требуемого уровня показателя эффективности реализации решения по нейтрализации возникающей проблемы в процессах управления вузом.

Связывая три процесса, протекающие в системе управления вузом с тремя зависимостями базовых компонентов управленческого решения и показателя эффективности реализации решения P , строится 3-х мерный график, соответствующий: обстановке $\Delta t_\lambda=f(\lambda(z_1, z_2, \dots, z_k))$, информационно-аналитической работе $\Delta t_{v1}=f_{v1}(x_1, x_2, \dots, x_n)$ и решению по нейтрализации возникшей проблемы в системе вуза $\Delta t_{v2}=f_{v2}(y_1, y_2, \dots, y_m)$.

Влияние кадрового состава на модель автоматизации принимаемых управленческих решений будет зависеть от своевременности идентификации и нейтрализации возникающей проблемы в системе. Чем раньше распознается проблема, тем быстрее по ней принимается решение ЛПР и она быстрее нейтрализуется, рис. 8.

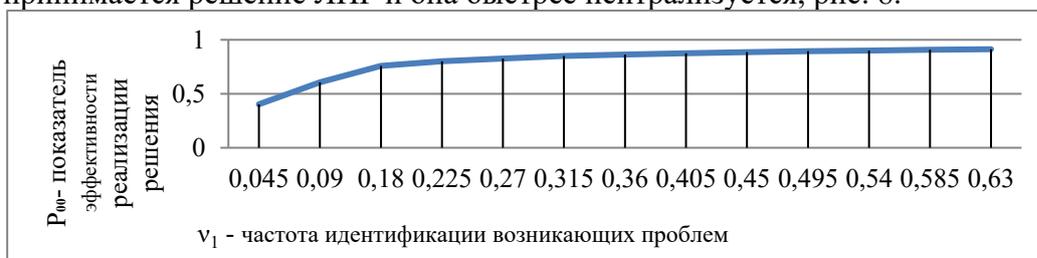


Рис. 8. Трехмерный график зависимости показателя эффективности реализации решения от интенсивностей

Fig. 8. Three-dimensional graph of the dependence of the efficiency indicator of the solution implementation on the intensities

Вывод. В публикуемой литературе и проводимых диссертационных исследованиях автоматизация изучаемых систем через решение обратной задачи и показатель эффективности реализации решения не рассматриваются, что позволяет делать вывод об актуальности проводимого исследования. Рассмотрение управленческого решения, через математическую модель позволяет получить показатель эффективности реализации решения и решать обратную задачу для формирования требуемых характеристик, позволяющих достигать цель деятельности. Влияние кадрового состава на модель автоматизации принятия управленческих решений очевидна, так как ведет к большей эффективности работы рассматриваемой системы, что позволяет достигать цель деятельности.

Библиографический список:

1. Козлова А.В. Разработка метода идентификации пригодности измерительного оборудования в управлении автоматизированными производственными системами: специальность 05.13.06 "Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям)": диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук.- 2021. – 174 с. – EDN ZYZQXS.
2. Чугунов А.П. Модели и алгоритмы интеллектуальной поддержки принятия решений при управлении сетевыми образовательными программами вузов с учетом индивидуальных предпочтений студентов: специальность 05.13.10 "Управление в социальных и экономических системах": автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Челябинск, 2018. – 24 с.
3. Деев М.В. Модели и методики управления жизненными циклами компонентов информационно-образовательной среды: специальность 05.13.10 "Управление в социальных и экономических системах": автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Пенза, 2018. – 24 с.
4. Боровкова Г.С. Методы и алгоритмы управления образовательным учреждением высшего образования с помощью рейтинговой системы: специальность 05.13.10 "Управление в социальных и экономических системах": автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук.– Липецк, 2019. – 24 с.
5. Сиделев, А.А. Методы и алгоритмы оперативного управления учебным процессом в профессиональных образовательных организациях: специальность 05.13.10 "Управление в социальных и экономических системах": автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук . – Волгоград, 2018. – 18 с.
6. Логинов К.В. Метод управления процессом прохождения учебного курса с применением событийно-ориентированных игровых механик: специальность 05.13.10 "Управление в социальных и экономических системах": автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук . – Санкт-Петербург, 2021. – 24 с.
7. Полетаikin, А.Н. Методология гибридного моделирования образовательной деятельности высшего учебного заведения: специальность 05.13.10 "Управление в социальных и экономических системах": автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Новосибирск, 2021. – 34 с.
8. Овчинников, А.А. Математическое и программное обеспечение системы оценивания результатов образования в вузе с учетом нелинейности процесса усвоения учебной информации: специальность 05.13.10 "Управление в социальных и экономических системах": автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Пермь, 2018. – 23 с.
9. Цвеллик, Е.А. Методика эффективного управления образовательными программами в вузе: специальность 05.13.10 "Управление в социальных и экономических системах": автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Волгоград, 2018. – 16 с.
10. Стаин, Д.А. Квалификационно-ориентированная экспертная система управления образовательным процессом вуза: специальность 05.13.10 "Управление в социальных и экономических системах": автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Челябинск, 2018. – 24 с.
11. Гончаренко, В.А. Роль человеческого фактора в процессах принятия управленческих решений и их эффективности / В.А. Гончаренко, А.Н. Богатова, В.Е. Хабаров // Наука и образование: актуальные вопросы, проблемы теории и практики: Сборник научных трудов Национальной (всероссийской) научно-практической конференции, Краснодар, 27 ноября 2020 года. – Краснодар: Краснодарский филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова", 2020. – С. 602-611. – EDN XBBYJK.
12. Гребенщикова, А.А. Влияние человеческого фактора на управление рисками и принятие управленческих решений / А.А. Гребенщикова // Структурные преобразования экономики территорий: в поиске социального и экономического равновесия : Сборник статей по материалам международной научно-практической конференции, Уфа, 24 декабря 2019 года. Том Часть 1. – Уфа: Общество с ограниченной ответственностью "Научно-издательский центр "Вестник науки", 2019. – С. 110-113. – EDN GZOZTX.
13. Дашкова, Е.С. Роль человеческого фактора в процессе разработки и реализации управленческих решений / Е.С. Дашкова // Мотивация и оплата труда. – 2016. – № 4. – С. 306-312. – EDN XGOENT.
14. Енгибарян, А.В. Роль человеческого фактора в принятии управленческого решения / А.В. Енгибарян, Ф.В. Шугилов // Производственный менеджмент: теория, методология, практика : сборник материалов VI Международной научно-практической конференции, Новосибирск, 18 мая–14 июня 2016 года / Министерство образования и науки РФ; Новосибирский государственный технический университет. – Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2016. – С. 125-130. – EDN WLMNFB.

15. Зуева, Ю.А. Роль человеческого фактора в принятии управленческих решений.// *Фундаментальные и прикладные исследования в области управления, экономики и торговли : Сборник трудов научно-практической и учебной конференции: в 3 частях, Санкт-Петербург, 05–07 июня 2018 года. Том Часть 1. – Санкт-Петербург: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого", 2018. – С. 209-212. – EDN XPNRVJ.*
16. Калущий И.В., Агафонов А.А. Роль человеческого фактора в обеспечении информационной безопасности бизнеса//*Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2012. № 2-2. С.173-178. EDN RDGWMТ.*
17. Маркова, Д.Г. Человеческий фактор в информационной безопасности / Д.Г. Маркова // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2018. – № 10. – С. 149-152. – EDN YRBHLN.*
18. Скворцов И.П., Титарев А.О. О проблеме человеческого фактора в обеспечении информационной безопасности // *Воздушно-космические силы. Теория и практика. – 2022. – № 23. – С. 106-113. – EDN HYFMVI.*
19. Еркин А.В. Человеческий фактор в обеспечении информационной безопасности автоматизированной системы электронного документооборота: теория и практика проявления/ *Вопросы управления - №3(16) 2011г.- С.31-39.*
20. Лаптева, О.Г. Автоматизация процесса управления рисками на предприятиях нефтегазовой промышленности: анализ автоматизированных систем управления рисками / О.Г. Лаптева, Н.В. Киселева // *Вестник науки и образования. – 2021. – № 5-1(108). – С. 5-13. – EDN KНJVIP.*
21. Суханова, Н.В. Разработка и применение нейросетевых моделей в автоматизации управления оборудованием и технологическими процессами / Н. В. Суханова // *Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. – 2022. – № 1(15). – С. 24-32. – DOI 10.30987/2658-6436-2022-1-24-32. – EDN IOLCED.*
22. Козлова, А.В. Разработка метода идентификации пригодности измерительного оборудования в управлении автоматизированными производственными системами : специальность 05.13.06 "Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям)" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук., 2021. – 174 с. – EDN ZYZQXS.
23. Ильюшин Ю.В. Разработка системы управления технологическим процессом добычи высокопарафинистой нефти: специальность 05.13.06 "Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям)": диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. 2021. 275 с. – EDN VUJDUА.
24. Скоробогатов, М.Э. Средства повышения эффективности автоматизированного управления движением поездов на участках, электрифицированных переменным током : специальность 05.13.06 "Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям)" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. 2021. – 134 с. – EDN KКУZJY.
25. Исаков, Т.А. Автоматизация регулирования пассажиропотока при проведении крупномасштабных культурно-массовых мероприятий: специальность 05.13.06 "Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям)" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. 2020. – 162 с. – EDN НТQYFE.
26. Ключкова, К.В. Автоматизированная система интеллектуальной поддержки принятия решений на этапе технологической подготовки производства изделий из композиционных материалов с требуемыми свойствами : специальность 05.13.06 "Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям)" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук., 2020. – 328 с. – EDN ХKYJKC.
27. Мартынова, Е.С. Автоматизированный контроль теплового состояния электродных печей при регулировании мощности электрической дуги : специальность 05.13.06 "Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям)" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Санкт-Петербург, 2020. – 132 с. – EDN ИHIOVT.
28. Мартынов, С.А. Повышение эффективности автоматизированного контроля и управления производства металлургического кремния в руднотермических печах: специальность 05.13.06 "Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям)" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Санкт-Петербург, 2020. – 20 с. – EDN KOGZAF.
29. Тихонов, М.Р. Разработка методики и алгоритмов повышения эффективности оценки рисков автоматизированных технологических процессов в приборостроении : специальность 05.13.06 "Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям)" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. 2020. – 179 с. – EDN GHWENY.
30. Денисов, М.С. Автоматизация производства заготовок из высокопрочных алюминиевых сплавов: специальность 05.13.06 "Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям)": диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. 2019. – 161 с. – EDN PISDTT.
31. Моисеев, Н.Н. Человек и биосфера: Опыт систем, анализа и эксперименты с моделями / Н.Н. Моисеев, В.В. Александров, А. М. Тарко. - М.: Наука, 1985. - 271 с..
32. Анохин, П.К. Идеи и факты в разработке теории функциональных систем// *Психологический журнал. – 1984. – Т.5. – С. 107-118.*
33. Бурлов В.Г., Грачев М.И. Аналитическо-динамическая модель управленческого решения в социально-экономических системах на примере руководителя учебного заведения высшего образования. *T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2019. – Т. 13, № 10. С. 27-34. DOI 10.24411/2072-8735-2018-10314. – EDN SNJZQR.*
34. Модель управления в социальных и экономических системах с учетом воздействия на информационные процессы в обществе / В.Г. Бурлов, М.И. Грачев, М.Н. Васильев, С.Ю. Капицын // *T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2020. – Т. 14, № 5. – С. 46-55. – DOI 10.36724/2072-8735-2020-14-5-46-55. – EDN IBIABC.*
35. Бурлов В.Г., Грачев М.И. Оценивание эффективности принятия управленческих решений в социально-экономических системах на примере учебного заведения высшего образования. *T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2020. – Т. 14, № 2. – С. 32-38. – DOI 10.36724/2072-8735-2020-14-2-32-38. – EDN YKNJZI.*

36. Новиков, Д.А. Модели динамики психических и поведенческих компонент деятельности в коллективном принятии решений / Д.А. Новиков // Управление большими системами: сборник трудов. – 2020. – № 85. – С. 206-237. – DOI 10.25728/ubs.2020.85.9. – EDN FHKVEN.
37. Дружинин В.В., Конторов Д.С., Конторов М.Д. Введение в теорию конфликта. М.: Радио и связь, 1989. 288 с.
38. Грачев, М.И. Математическое моделирование в социальных и экономических системах / М.И. Грачев, В.Г. Бурлов // Т-Комм: Телекоммуникации и транспорт. – 2021. – Т. 15, № 5. – С. 38-45. – DOI 10.36724/2072-8735-2021-15-5-38-45. – EDN CRNULK.

References:

1. Kozlova, A.V. Development of a method for identifying the suitability of measuring equipment in the management of automated production systems: specialty 05.13.06 "Automation and control of technological processes and industries (by industry)": dissertation for the degree of candidate of technical sciences. 2021;– 174 – EDN ZYZQXS. (In Russ)
2. Chugunov, A.P. Models and algorithms of intellectual decision support in the management of online educational programs of universities, taking into account the individual preferences of students: specialty 05.13.10 "Management in social and economic systems": abstract of the dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences. Chelyabinsk, 2018; 24. (In Russ)
3. Deev, M.V. Models and methods of life cycle management of components of the information and educational environment: specialty 05.13.10 "Management in social and economic systems": abstract of the dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences. Penza, 2018; 24 (In Russ)
4. Borovkova, G.S. Methods and algorithms for managing an educational institution of higher education using a rating system: specialty 05.13.10 "Management in social and economic systems": abstract of the dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences. – Lipetsk, 2019; 24. (In Russ)
5. Sidelev, A.A. Methods and algorithms of operational management of the educational process in professional educational organizations: specialty 05.13.10 "Management in social and economic systems": abstract of the dissertation for the degree of Candidate of technical Sciences. Volgograd, 2018; 18. (In Russ)
6. Loginov, K.V. Method of managing the process of completing the training course using event-oriented game mechanics: specialty 05.13.10 "Management in social and economic systems": abstract of the dissertation for the degree of candidate of technical sciences. – St. Petersburg, 2021; 24. (In Russ)
7. Poletaykin, A.N. Methodology of hybrid modeling of educational activities of higher educational institutions: specialty 05.13.10 "Management in social and economic systems": abstract of the dissertation for the degree of candidate of technical Sciences.. Novosibirsk, 2021; 34. (In Russ)
8. Ovchinnikov, A.A. Mathematical and software support of the system for evaluating educational results in higher education, taking into account the nonlinearity of the learning information assimilation process: specialty 05.13.10 "Management in social and economic systems": abstract of the dissertation for the degree of candidate of technical Sciences . Perm, 2018; 23. (In Russ)
9. Tsvelik, E.A. Methodology of effective management of educational programs at the university: specialty 05.13.10 "Management in social and economic systems": abstract of the dissertation for the degree of candidate of technical sciences. Volgograd, 2018; 16. (In Russ)
10. Stain, D.A. Qualification-oriented expert management system of the educational process of the university: specialty 05.13.10 "Management in social and economic systems": abstract of the dissertation for the degree of candidate of technical sciences.. – Chelyabinsk, 2018; 24. (In Russ)
11. Goncharenko, V.A. The role of the human factor in the processes of managerial decision-making and their effectiveness / V.A. Goncharenko, A.N. Bogatova, V.E. Khabarov // Science and education: topical issues, problems of theory and practice: Collection of scientific papers of the National (All-Russian) scientific and practical conference, Krasnodar, November 27 2020. – Krasnodar: Krasnodar branch of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Plekhanov Russian University of Economics", 2020; 602-611. – EDN XBBYJK. (In Russ)
12. Grebenshchikova, A.A. The influence of the human factor on risk management and management decision-making / A.A. Grebenshchikova // Structural transformations of the economy of territories: in search of social and economic equilibrium : A collection of articles based on the materials of the international scientific and practical conference, Ufa, December 24, 2019. Volume Part 1. – Ufa: Limited Liability Company "Scientific Publishing Center "Bulletin of Science", 2019; 110-113. – EDN GZOTX. (In Russ)
13. Dashkova, E.S. The role of the human factor in the process of developing and implementing management decisions / E.S. Dashkova. *Motivation and remuneration*. 2016; 4: 306-312. – EDN XGOENT. (In Russ)
14. Engibaryan A.V., Shutilov F.V. The role of the human factor in making managerial decisions. Production management: theory, methodology, practice : collection of materials of the VI International Scientific and Practical Conference, Novosibirsk, May 18–June 14, 2016. Ministry of Education and Science of the Russian Federation; Novosibirsk State Technical University. Novosibirsk: Novosibirsk State Technical University, 2016;125-130. EDN WLMNFB. (In Russ)
15. Zueva, Yu. A. The role of the human factor in managerial decision-making. Fundamental and applied research in the field of management, economics and trade : Proceedings of the scientific, practical and educational conference: in 3 parts, St. Petersburg, 05-07 June 2018; 1. St. Petersburg: Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University", 2018; 209-212. EDN XPNRVJ. (In Russ)
16. Kalutsky, I.V. The role of the human factor in ensuring business information security / I.V. Kalutsky, A.A. Agafonov *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Series: Management, Computer engineering, computer science. Medical instrumentation*. 2012; 2-2:173-178. – EDN RDGWMT. (In Russ)
17. Markova, D.G. The human factor in information security. *Proceedings of Tula State University. Technical sciences*. 2018;10:149-152. – EDN YRBHLN. (In Russ)
18. Skvortsov, I.P. On the problem of the human factor in ensuring information security / I.P. Skvortsov, A.O. Titarev // *Aerospace forces. Theory and practice*. 2022; 23:106-113. – EDN HYFMVI. (In Russ)

19. Yerkin A.V. The human factor in ensuring information security of an automated electronic document management system: theory and practice of manifestation/Management issues 2011;3(16) 31-39. (In Russ)
20. Lapteva O.G., Kiseleva N.V. Automation of the risk management process at oil and gas industry enterprises: analysis of automated risk management systems. *Bulletin of Science and Education*. 2021; 5-1(108): 5-13. EDN KHJVIP. (In Russ)
21. Sukhanova, N.V. Development and application of neural network models in automation of control of equipment and technological processes. *Automation and modeling in design and management*. 2022;1(15): 24-32. – DOI 10.30987/2658-6436-2022-1-24-32. – EDN IOLCED. (In Russ)
22. Kozlova, A.V. Development of a method for identifying the suitability of measuring equipment in the management of automated production systems : specialty 05.13.06 "Automation and control of technological processes and productions (by industry)": dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences. 2021;174 – EDN ZYZQXS. (In Russ)
23. Ilyushin, Yu. V. Development of a control system for the technological process of high-paraffin oil production: specialty 05.13.06 "Automation and control of technological processes and productions (by industry)" : dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences / Ilyushin Yuri Valeryevich, 2021; 275 . – EDN VUJDUA. (In Russ)
24. Skorobogatov, M.E. Means of improving the efficiency of automated train traffic control in sections electrified with alternating current : specialty 05.13.06 "Automation and control of technological processes and industries (by industry)" : dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences. 2021; 134 . – EDN KUZJY. (In Russ)
25. Iskakov, T.A. Automation of passenger traffic control during large-scale cultural events: specialty 05.13.06 "Automation and control of technological processes and industries (by industry)" : dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences. 2020;162 – EDN HTQYFE. (In Russ)
26. Klochkova, K.V. Automated system of intellectual decision-making support at the stage of technological preparation for the production of products made of composite materials with the required properties : specialty 05.13.06 "Automation and control of technological processes and productions (by industry)" : dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences., 2020; 328 – EDN XKYJKC. (In Russ)
27. Martynova, E.S. Automated control of the thermal state of electrode furnaces when regulating the power of an electric arc : specialty 05.13.06 "Automation and control of technological processes and industries (by industry)" : dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences . – St. Petersburg, 2020; 132: EDN IHIOVT. (In Russ)
28. Martynov, S.A. Improving the efficiency of automated control and management of metallurgical silicon production in ore-thermal furnaces: specialty 05.13.06 "Automation and control of technological processes and industries (by industry)" : abstract of the dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences.St. Petersburg, 2020; 20. – Publishing House of kogzaf. (In Russ)
29. Tikhonov, M.R. Development of methods and algorithms for improving the effectiveness of risk assessment of automated technological processes in instrument engineering : specialty 05.13.06 "Automation and control of technological processes and industries (by industry)" : dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences. 2020; 179 – GHWEHY ED. (In Russ)
30. Denisov, M.S. Automation of the production of blanks from high-strength aluminum alloys: specialty 05.13.06 "Automation and control of technological processes and industries (by industry)": dissertation for the degree of candidate of technical Sciences. 2019; 161 – EDN PISDTT. (In Russ)
31. Moiseev, N.N. Man and the biosphere: The experience of systems, analysis and experiments with models / N.N. Moiseev, V.V. Alexandrov, A.M. Tarko. - M.: Nauka, 1985; 271 . (In Russ)
32. Anokhin, P.K. Ideas and facts in the development of the theory of functional systems. *Psychological Journal*. 1984;5.: 107-118. (In Russ)
33. Burlov, V.G. Analytical and dynamic model of managerial decision in socio-economic systems on the example of the head of an educational institution of higher education / V.G. Burlov, M.I. Grachev // *T-program comm: Telecommunications and transport*. 2019.; 13(10): 27-34. – DOI 10.24411/2072-8735-2018-10314. – ED. SNJZQR. (In Russ)
34. Management model in social and economic systems, taking into account the impact on information processes in society / V.G. Burlov, M.I. Grachev, M.N. Vasiliev, S.Yu. Kapitsyn. *T-program comm: Telecommunications and transport*. 2020; 14(5): 46-55. – DOI 10.36724/2072-8735-2020-14-5-46-55. – EDN IBIABC. (In Russ)
35. Burlov, V.G. Evaluating the effectiveness of managerial decision-making in socio-economic systems on the example of an educational institution of higher education / V.G. Burlov, M.I. Grachev // *T-program comm: Telecommunications and transport*. 2020;14(2): 32-38. - DOI 10.36724/2072-8735-2020-14-2-32-38- EDN YUKNISI. (In Russ)
36. Novikov, D.A. Models of dynamics of mental and behavioral components of activity in collective decision-making / D.A. Novikov. *Management of large systems: proceedings*. 2020; 85: 206-237. – DOI 10.25728/ubs.2020.85.9. – ED. FHKBEH. (In Russ)
37. Druzhinin V.V., Kontorov D.S., Kontorov M.D. Introduction to the theory of conflict. M.: Radio and Communications, 1989; 288 . (In Russ)
38. Grachev, M.I., Burlov V.G. Mathematical modeling in social and economic systems. *T-program comm: Telecommunications and transport*. 2021;15(5):38-45. – Doi 10.36724/2072-8735-2021-15-5-38-45. – EDN CRNULK. (In Russ)

Сведения об авторе:

Грачев Михаил Иванович, научный сотрудник научно-исследовательского отдела; mig2500@mail.ru.
ORCID:0000-0002-0338-3049

Information about author:

Mikhail I. Grachev, Researcher, Research Department; mig2500@mail.ru; orcid:0000-0002-0338-3049

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/ Received 24.05.2024.

Одобрена после рецензирования / Reviced 27.07.2024.

Принята в печать /Accepted for publication 10.10.2024.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 519.711.2



DOI: 10.21822/2073-6185-2024-51-4-71-79

Оригинальная статья/ Original article

Моделирование процессов функционирования организационно-технической системы на основе марковских случайных процессов

А.О. Железняков¹, Р.А. Жилин²

¹Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»,

¹394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54 а, Россия,

²Воронежский институт МВД России,

²394065, г. Воронеж, пр. Патриотов, 53, Россия

Резюме. Цель. В настоящей работе рассмотрены и проанализированы основные подходы к моделированию процессов функционирования организационно-технической системы, в частности процессов технического обслуживания и ремонта (ТОиР) вооружения, военной и специальной техники (ВВСТ) ремонтными подразделениями эксплуатирующей организации (ЭО) с использованием математической модели марковских случайных процессов, которая позволит оценить вероятностные характеристики процессов ТОиР ВВСТ при выполнении мероприятий повседневной деятельности, заключающихся в проведении работ по восстановлению исправности ВВСТ, а также проведению технического обслуживания и эксплуатации ОТС. **Метод.** В основе моделирование процессов - вероятностные модели, в частности, теория случайных процессов. **Результат.** Обосновано использование математической модели Марковских случайных процессов; разработан граф состояний процессов по техническому обслуживанию и ремонту ВВСТ; реализована система поддержки принятия решений на базе PTC Mathcad Prime. В качестве исходных параметров моделирования в работе использована усредненная обобщенная статистическая информация надежности ВВСТ. **Вывод.** Полученные результаты позволят восстанавливать исправность и работоспособность ВВСТ как на предприятиях ВПК, так и в условиях эксплуатирующей организации не выходя за временные рамки, установленные в нормативно-технических положениях. Рассмотренные подходы моделирования процессов функционирования организационно-технической системы являются мощным инструментом для принятия обоснованных и эффективных решений в управлении, они позволяют учесть множество факторов, провести сценарный анализ и оптимизировать решения, а также использовать ЭВМ для более точных и сложных расчетов.

Ключевые слова: организационно-технические системы, моделирование, принятие решений, управление, процесс, анализ

Для цитирования: А.О. Железняков, Р.А. Жилин. Моделирование процессов функционирования организационно-технической системы на основе марковских случайных процессов. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2024; 51(4):71-79. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-4-71-79

Modeling of the processes of functioning of an organizational and technical system based on Markov random processes

A.O. Zheleznyakov¹, R.A. Zhilin²

¹Military Educational and Scientific Center of the Air Force «Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin»,

¹54 a Old Bolsheviks St., Voronezh 394064, Russia,

²53 Patriotov Ave., Voronezh 394065, Russia

Abstract. Objective. In this paper, the main approaches to modeling the processes of functioning of the organizational and technical system, in particular the processes of maintenance and repair (MRO) of weapons, military and special equipment (VVST) by repair units of the operating organization (EO) using a mathematical model of Markov random processes, which will allow to evaluate the probabilistic characteristics of MRO processes of the VVST at carrying out activities of daily activities, which consist in carrying out work to restore the serviceability of the VST, as well as carrying out maintenance and operation of the OTS. **Method.** The modeling of processes is based on probabilistic models, in particular, the theory of random processes. **Result.** The use of a mathematical model of Markov random processes is justified. A graph of the states of the processes for maintenance and repair of VVST has been developed. A decision support system based on PTC Mathcad Prime has been implemented. The averaged generalized statistical information on the reliability of the VST was used as the initial modeling parameters in the work. **Conclusion.** The results obtained will make it possible to restore the serviceability and operability of the military-industrial complex both at the enterprises of the military-industrial complex and in the conditions of the operating organization without going beyond the time limits established in the regulatory and technical regulations. The considered approaches to modeling the processes of functioning of an organizational and technical system are a powerful tool for making informed and effective management decisions, they allow you to take into account many factors, conduct scenario analysis and optimize solutions, as well as use computers for more accurate and complex calculations.

Keywords: organizational and technical systems, modeling, decision-making, management, process, analysis.

For citation: A.O. Zheleznyakov, R.A. Zhilin. Modeling of the processes of functioning of an organizational and technical system based on Markov random processes. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2024; 51(4):71-80. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-4-71-80

Введение. Организационно-технические системы (ОТС) – это сложные системы с организационно-штатной структурой управленческого и технического персонала, оснащенные производственными фондами и запасами материально-технических ресурсов (МТР), включающие в себя сложные технические объекты, эксплуатация которых является целью функционирования системы [1, 2, 3].

Отметим, что процесс эксплуатации организационно-технических систем осуществляется в соответствии с программой эксплуатации, которая представляет собой совокупность нормативно-технических положений, регламентирующих действия управленческого и технического персонала по отношению к техническим объектам на различных этапах жизненного цикла ОТС [4, 5, 6].

Постановка задачи. Целью работы является моделирование процессов функционирования организационно-технической системы, в частности процессов технического обслуживания и ремонта (ТОиР) вооружения, военной и специальной техники (ВВСТ) ремонтными подразделениями эксплуатирующей организации (ЭО) с использованием математической модели марковских случайных процессов, которая позволит оценить вероятностные характеристики процессов ТОиР ВВСТ при выполнении мероприятий повседневной деятельности, заключающихся в проведении работ по восстановлению исправности ВВСТ, а также проведению технического обслуживания и эксплуатации ОТС.

Образцы вооружения военной и специальной техники при интенсивной эксплуатации подвергаются механическим, термическим, акустическим, радиационным и другим видам воздействий, которые носят случайный характер и под воздействием которых в составных узлах изделий, агрегатов, из состава ВВСТ возникают накапливающиеся повреждения, отказы, неисправности, приводящие к необратимым последствиям и изменению технического состояния объекта.

Методы исследования. Техническое состояние объекта (ТСО) – это совокупность свойств объекта, изменяющихся при его эксплуатации. ТСО характеризуется в определённый момент времени степенью соответствия фактических показателей свойств установленным в нормативно-технической и конструкторской документации [7, 8]. Результаты механических, термических, акустических, радиационных и других видов воздействий на вооружение, военную и специальную технику носят стохастический характер. Одним из способов прогнозирования технического состояния ВВСТ является использование вероятностного подхода.

Моделирование процессов организации ремонтных работ по восстановлению исправности и работоспособности образцов вооружения военной и специальной техники, а также технического обслуживания целесообразно осуществлять, используя вероятностные модели, в частности, используя теорию случайных процессов [9, 10]. Учитывая тот факт, что согласно пространственно-временной модели, ВВСТ получают разного рода повреждения по результатам появления событий из множества случайных потоков, при этом обычно идет наложение (суммирование) потоков событий различной природы или их случайное разрежение, при этом события, приводящие к выходу из строя определенного оборудования ВВСТ, являются независимыми. Данное обстоятельство свидетельствует о том, что поток событий приводящий к выводу из строя ВВСТ согласно предельной теореме потоков событий является потоком Пуассона с плотностью распределения длительностей интервалов $f_{\text{омк}}(t) = \lambda e^{-\lambda t}$ [11, 12].

Если рассматривать поток заявок на выполнение технического обслуживания и ремонта оборудования ВВСТ после их поломки, то он обусловлен влиянием множества случайных факторов, что позволяет считать поток восстановленного оборудования ВВСТ после технического обслуживания и ремонта пуассоновским. Время восстановления случайно выбранного отказавшего оборудования ВВСТ характеризуется плотностью распределения вида:

$$f_{\text{рем}}(t) = \mu e^{-\mu t} \quad (1)$$

где μ – интенсивность восстановления отказавшего оборудования ВВСТ одним ремонтным подразделением.

Вышеперечисленные обстоятельства нашли свое подтверждение в работах [13, 14], связанных с моделированием организационно-технических систем. Указанные авторы аргументированно доказывают, что поток событий, приводящий к выводу из строя ВВСТ, можно считать потоком Пуассона. Данные доказательства позволяют использовать для моделирования процессов технического обслуживания и ремонта отказавшего оборудования ВВСТ математическую модель марковских случайных процессов.

Введем следующие допущения и обозначения. Имеется некоторое количество ВВСТ, у которых периодически отказывает оборудование, количество которого обозначим M . Интенсивность заявок на техническое обслуживание и ремонт определим λ , которая является обобщенной или усредненной интенсивностью.

Предположим, что имеется L типов изделий из состава ВВСТ, которые могут выходить из строя, каждый с интенсивностью λ_k , $k=1, 2, \dots, L$. Количество изделий каждого типа равно n_k , следовательно, обобщенная интенсивность заявок на техническое обслуживание и ремонт может быть рассчитана по следующей формуле:

$$\lambda = \frac{\sum_{k=1}^L n_k \lambda_k}{\sum_{k=1}^L n_k} \quad (2)$$

Далее, имеются ремонтные подразделения, выполняющие работы по техническому обслуживанию и ремонту ВВСТ, количество которых равно N . Рассмотрим ситуацию, когда время восстановления исправности изделий ВВСТ с номером m составляет T_m , общее число таких изделий K , а количество блоков каждого вида, требующих ремонта f_m . Тогда, обобщенный (усредненный) поток восстановлений будет рассчитан по следующей формуле:

$$\mu = \frac{\sum_{m=1}^K \frac{f_m}{T_m}}{\sum_{m=1}^K f_m} \quad (3)$$

В случае поступления заявки на техническое обслуживание и ремонт, т.е. наступление отказа или неисправности вооружения, военной и специальной техники, ВВСТ подлежит восстановлению в любом свободном ремонтном подразделении. Однако, если все специалисты данного подразделения обременены работой, то неисправное вооружение, военная и специальная техника становятся в очередь на обслуживание. В таком случае для оперативного восстановления вооружения, военной и специальной техники необходимо направить отказавшее изделие ВВСТ на предприятия военно-промышленного комплекса. Вышеперечисленные обстоятельства определяют принятие управленческого решения о выборе способа и места ремонта отказавшего оборудования ВВСТ с последующим анализом каждого типа неисправности и принятия решения по каждой из них.

Обсуждение результатов. На основании вышеуказанных допущений составим граф состояний процессов по техническому обслуживанию и ремонту ВВСТ, который приведен на рис. 1.

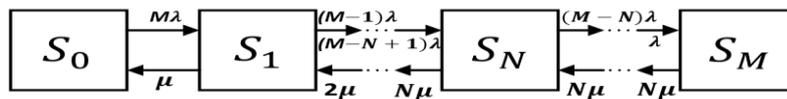


Рис. 1. Граф состояний процессов по ТОиР ВВСТ

Fig. 1. State graph of processes for maintenance and repair of air-technical equipment

Воспользовавшись теорией массового обслуживания, осуществим расчет показателей описанного случайного процесса [15, 16, 17].

Введем приведенную интенсивность $\rho = \lambda/\mu$, учитывая следующее:

1. Вероятность того, что все оборудование будет исправно и все ВВСТ полностью исправны (промежуточный показатель):

$$P_0 = \frac{1}{1 + \frac{\rho}{1!} + \frac{\rho^2}{2!} + \dots + \frac{\rho^N}{N!} + \frac{\rho^{N+1}}{N \cdot N!} \cdot \frac{1 - (\rho/N)^{M-N}}{1 - \rho/N}} \quad (4)$$

2. Вероятность того, что в ремонте будет находиться n отказавшего оборудования ВВСТ:

$$P_n = \begin{cases} \frac{\rho^n}{n!} P_0, & n = 1, 2, \dots, N; \\ \frac{\rho^n}{N^{n-N} N!} P_0, & n = N + 1, N + 2, \dots, M. \end{cases} \quad (5)$$

Тогда, данное соотношение будет определять вероятность отказавшего оборудования ВВСТ, которое находится в очереди на обслуживание. В таком случае, среднее число отремонтированного оборудования ВВСТ за единицу времени будет определяться формулой (6), а среднее число задействованных ремонтных подразделений формулой (7):

$$A = \lambda \cdot \left(1 - \frac{\rho^M}{N^{M-N} N!} P_0 \right) \quad (6)$$

$$\bar{N} = \frac{A}{\mu} = \rho \cdot \left(1 - \frac{\rho^M}{N^{M-N} N!} P_0 \right) \quad (7)$$

При данных условиях, средняя длина очереди отказавшего оборудования ВВСТ, которое требует ремонта будет определяться формулой (8):

$$L_q = \begin{cases} \frac{\rho^{N+1}}{N \cdot N!} \cdot \frac{1 - \left(\frac{\rho}{N}\right)^{(M-N)} \left(M - N + 1 - (M - N) \frac{\rho}{N} \right)}{\left(1 - \frac{\rho}{N} \right)^2} \cdot P_0, & \text{при } \rho \neq N \\ \frac{\rho^{N+1}}{N \cdot N!} \cdot \left(1 + 2 \left(\frac{\rho}{N}\right) + 3 \left(\frac{\rho}{N}\right)^2 + \dots + (M - N) \left(\frac{\rho}{N}\right)^{M-1} \right) \cdot P_0, & \text{при } \rho = N \end{cases} \quad (8)$$

В этом случае, среднее время, проведенное в очереди для восстановления отказавшего оборудования ВВСТ будет определяться формулой (9), а среднее время, проведенное в ремонте для отказавшего оборудования ВВСТ формулой (10):

$$W_q = \frac{L_q}{\lambda} \quad (9)$$

$$W_s = W_q + \frac{A}{\lambda \mu} = \frac{L_q}{\lambda} + \frac{A}{\lambda \mu} \quad (10)$$

Осуществим моделирование процессов технического обслуживания и ремонта отказавшего оборудования ВВСТ с использованием РТС Mathcad Prime. В качестве исходных параметров будем использовать усредненную обобщенную статистическую информацию надежности ВВСТ. На рис. 2 представлен график зависимости среднего отремонтированного оборудования за час от приведенной интенсивности при разном количестве ВВСТ.

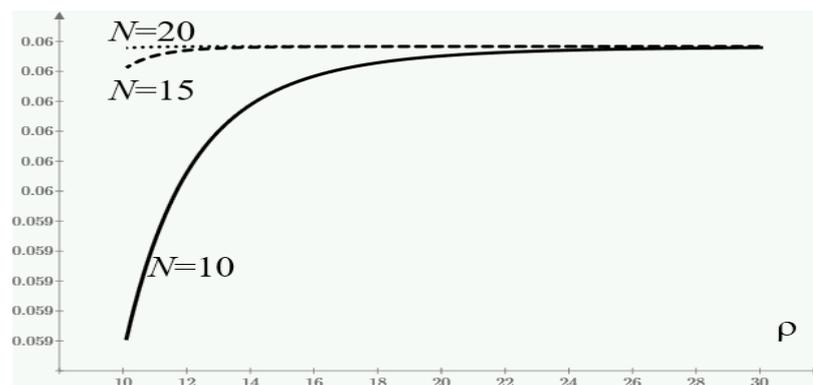


Рис. 2. Среднее число отремонтированного оборудования за час (A),

как функция приведенной интенсивности при разном количестве ВВСТ

Fig. 2. Average number of equipment repaired per hour (A) as a function of reduced intensity for different amounts of airborne equipment

Аналогичная зависимость для среднего количества задействованных ремонтных подразделений приведена на рис. 3. На основе выше представленных зависимостей реализуем систему поддержки принятия решений для управления ТОиР оборудования ВВСТ, которая позволит принимать управленческие решения о восстановлении исправности или работоспособности в условиях эксплуатирующей организации, либо об отправке в ремонт на предприятия ВПК.

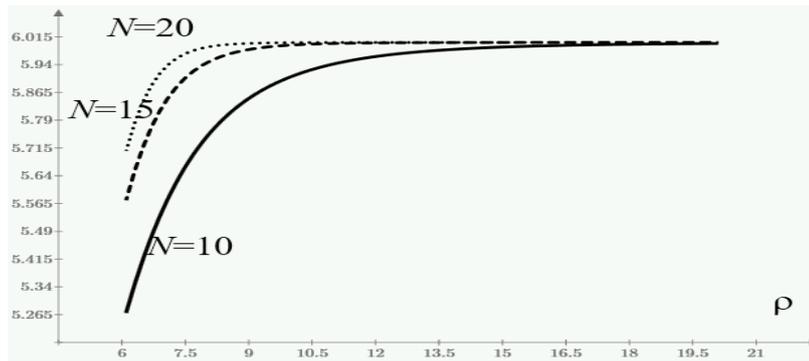


Рис. 3. Среднее количество занятых ремонтных подразделений \bar{N} , как функция приведенной интенсивности при разном количестве ВВСТ
Fig. 3. Average number of occupied repair units \bar{N} as a function of reduced intensity for different numbers of military equipment

Одной из характеристик, которая позволит принять решение о выборе способа и места ремонта отказавшего оборудования ВВСТ с последующим анализом каждого типа неисправности будет являться средняя длина очереди (L_q) на ТОиР, график которой приведен на рис. 4.

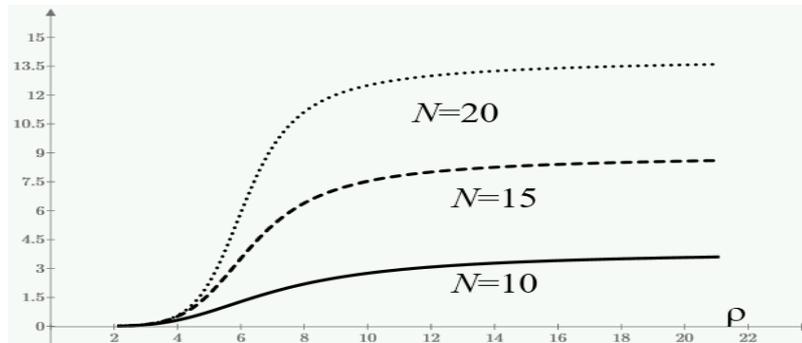


Рис. 4. Среднее количество ВВСТ, ожидающих ТОиР в очереди L_q , как функция приведенной интенсивности при разном количестве ВВСТ
Fig. 4. The average number of military equipment waiting for maintenance and repair in the queue L_q as a function of the reduced intensity for different numbers of military equipment

Другая, не менее важная характеристика – время, проведенное в очереди образца ВВСТ (W_q), графически представлена на рис. 5.

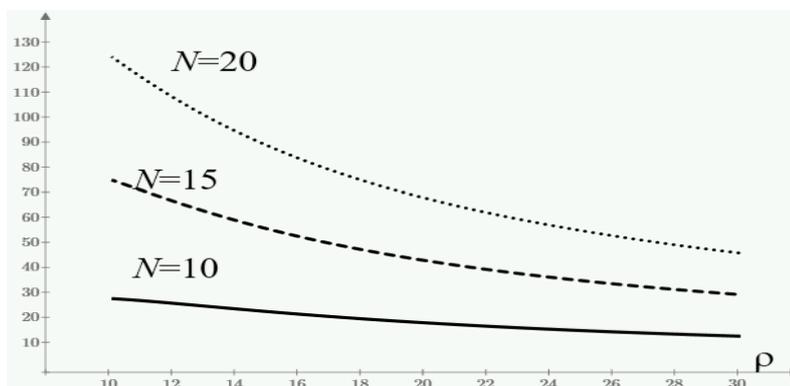


Рис. 5. Среднее время ожидания ВВСТ очереди на ремонт W_q (часы), как функция приведенной интенсивности при разном количестве ВВСТ
Fig. 5. The average waiting time for a queue for repairs W_q (hours), as a function of the reduced intensity for different quantities of military equipment

Определим вероятность образования очереди образцов ВВСТ ($P_{очередь}$) с целью принятия решения об отправке ВВСТ на предприятие ВПК по следующей формуле:

$$P_{очередь} = P_0 \sum_{n=N+1}^M \frac{\rho^n}{N^{n-N} N!}. \quad (11)$$

Графическое представление полученного результата изображено на рис. 6.

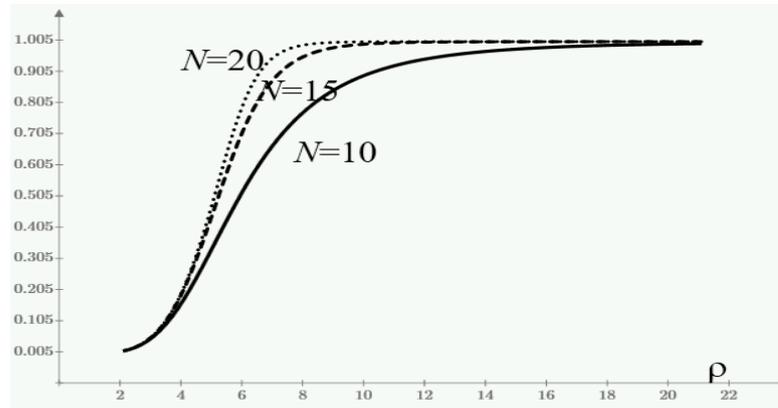


Рис. 6. Вероятность образования очереди на ремонт $P_{очередь}$, как функция приведенной интенсивности при разном количестве ВВСТ
Fig. 6. Probability of the formation of a queue for repairs $P_{очередь}$ as a function of the reduced intensity for different quantities of military equipment

Анализ данных показателей для каждой заявки на ТОиР в последующем позволит восстанавливать исправность и работоспособность ВВСТ как на предприятиях ВПК, так и в условиях эксплуатирующей организации не выходя за временные рамки, установленные в нормативно-технических положениях, регламентирующих действия управленческого и технического персонала по отношению к техническим объектам на различных этапах жизненного цикла организационно-технических систем.

Вывод. В ходе моделирования процессов технического обслуживания и ремонта отказавшего оборудования ВВСТ были решены следующие задачи:

1. Анализ научной литературы показал, что моделирование процессов организации ремонтных работ по восстановлению исправности и работоспособности образцов вооружения, военной и специальной техники, а также технического обслуживания целесообразно осуществлять используя вероятностные модели, в частности, используя теорию случайных процессов.

2. Для моделирования процессов технического обслуживания и ремонта отказавшего оборудования ВВСТ в ходе исследования обосновано использование математической модели марковских случайных процессов.

3. Разработан граф состояний процессов по техническому обслуживанию и ремонту ВВСТ.

4. Реализована система поддержки принятия решений на базе РТС Mathcad Prime.

5. В качестве исходных параметров моделирования в работе использована усредненная обобщенная статистическая информация надежности ВВСТ.

6. Полученные результаты позволят восстанавливать исправность и работоспособность ВВСТ как на предприятиях ВПК, так и в условиях эксплуатирующей организации не выходя за временные рамки, установленные в нормативно-технических положениях.

Библиографический список:

1. Управление организационно-техническими системами. Учебник для иностранных военнослужащих, обучающихся в Военно-воздушной инженерной академии им. проф. Н.Е. Жуковского. В.Я. Головин, А.С. Шаламов, В.Н. Миронычев, Ю.В. Митрофанов, А.Е. Гриценко, С.М. Ямпольский. Под ред. В.Я. Головина. – М.: Изд. ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2006. – 580 с.
2. Жилин, Р.А. Численный метод кластеризации однородных альтернатив, характеризующих качество антитеррористической защищенности объектов органов внутренних дел, на основе суммы различий взвешенных признаков / Р.А. Жилин, А.В. Мельников, Г.В. Перминов // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2020. – Т. 8, № 4(31).
3. Жилин, Р.А. Формирование пространства признаков для оценки антитеррористической защищенности объектов органов внутренних дел / Р.А. Жилин // Охрана, безопасность, связь. – 2021. – № 6-2. – С. 79-83.
4. Головин, В.Я. Информационное и математическое обеспечение задач управления организационно-техническими системами. – Воронеж: Издание Военного авиационного технического университета, 2002. – 231 с.
5. Akhlyustin, S.B. Prediction of the Integrated Indicator of Quality of a New Object Under the Conditions of Multicollinearity of Reference Data / S.B. Akhlyustin, A.V. Melnikov, R.A. Zhilin // Bulletin of the South Ural State University. Series: Mathematical Modelling, Programming and Computer Software. – 2020. – Vol. 13, No. 4. – P. 66-80.
6. Численный метод оценки значимости критериев в группах однородных альтернатив / Р.А. Жилин, А.В. Мельников, Д.Н. Черников, К.А. Мельник // Вестник Воронежского института ФСИИ России. – 2021. – № 3. – С. 57-63.
7. Моделирование оценки эффективности функционирования систем безопасности объектов органов внутренних дел / Р.А. Жилин, А.В. Мельников, С.Б. Ахлюстин, В.В. Горлов. – Воронеж : Воронежский институт Министерства внутренних дел Российской Федерации, 2023. – 104 с.
8. Жилин, Р.А. Пространство признаков нарушителя систем безопасности общекриминальной направленности / Р.А. Жилин // Математические методы и информационные технологии в моделировании систем : Материалы V Всероссийской (национальной) научно-практической конференции, Воронеж, 29 апреля 2021 года. – Воронеж: Издательство "Научная книга", 2021. – С. 25-27.
9. Вентцель Е.С. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения / Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров. – М.: Высш. шк., 1998. – 354 с.
10. Матальцкий, М.А. Элементы теории случайных процессов: учеб. пособие. Гродно: ГрГУ, 2004. 326 с.
11. Алексеев О.Г., Анисимов В.Г., Анисимов Е.Г Марковские модели боя. – М.: МО СССР, 1985. – 85 с.
12. Козирацкий Ю.Л. Моделирование совместного применения средств радиоэлектронной борьбы и огневого поражения в интересах повышения эффективности борьбы за превосходство в управлении/ С.Н. Козлитин, С.А. Будников//Системы управления, связи и безопасности. – № 1. – 2020. – С. 49-73.
13. Бурков, В.Н. Модели, методы и механизмы управления и принятия решений в организационных системах : учебное пособие / В.Н. Бурков, Н.А. Коргин. – Москва : Академия ИБС, 2009. – 222 с.
14. Баркалов, С.А. Моделирование процесса принятия решений на основе марковских случайных процессов / С.А. Баркалов, В.П. Морозов, С.И. Моисеев // Математические методы и информационные технологии в моделировании систем : Материалы V Всероссийской (национальной) научно-практической конференции, Воронеж, 29 апреля 2021 года. – Воронеж: Издательство «Научная книга», 2021. – С. 52 - 59.
15. Плескунов, М.А. Теория массового обслуживания: учебное пособие / М.А. Плескунов; М-во науки и высшего образования РФ, Урал. федер. унт. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2022. – 264 с.
16. Мельников, А.В. Анализ основных подходов к моделированию процессов управления организационно-техническими системами специального назначения / А.В. Мельников, А.А. Караваев, А.О. Железняков // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2024. – Т. 51, № 1. – С. 153-165. – DOI 10.21822/2073-6185-2024-51-1-153-165.
17. Патент № RU 2 778 170 С1, МПК В64F 5/40, В64F 5/60, G06Q 10/06. Способ ремонта авиационной техники в процессе эксплуатации в пунктах постоянной дислокации: № 2021129667: заявл. 11.10.2021: опубл. 15.08.2022 / Железняков А.О., Сидорчук В.П. – 8 с.

References:

1. Management of organizational and technical systems. Textbook for foreign military personnel studying at the Zhukovsky Military Air Engineering Academy. V.Ya. Golovin, A.S. Shalamov, V.N. Mironychev, Yu.V. Mitrofanov, A.E. Gritsenko, S.M. Yampolsky. Edited by V.Ya. Golovin. M.: Publishing House of the VVIA named after prof. N.E. Zhukovsky, 2006. (In Russ)

2. Zhilin R.A. Numerical method of clustering homogeneous alternatives characterizing the quality of anti-terrorist protection of objects of internal affairs bodies, based on the sum of differences in weighted signs. Modeling, optimization and information technologies. 2020; (8 4(31) (In Russ).
3. Zhilin R.A. Formation of a space of signs for assessing the anti-terrorist security of objects of internal affairs bodies. Protection, security, communications. 2021; (6-2) (In Russ).
4. Golovin V.Ya. Information and mathematical support of organizational and technical systems management tasks. Voronezh: Edition of the Military Aviation Technical University, 2002. (In Russ)
5. Akhlyustin S.B., Melnikov A.V., Zhilin R.A. Prediction of the Integrated Indicator of Quality of a New Object Under the Conditions of Multicollinearity of Reference Data. Bulletin of the South Ural State University. Series: Mathematical Modelling, Programming and Computer Software. 2020;. (13 (4)).
6. Zhilin R.A., Melnikov A.V., Chernikov D.N., Melnik K.A. A numerical method for assessing the significance of criteria in groups of homogeneous alternatives. Bulletin of the Voronezh Institute of the Federal Penitentiary Service of Russia. 2021; (3). (In Russ)
7. Zhilin R.A., Melnikov A.V., Akhlyustin S.B. Modeling of the assessment of the effectiveness of the functioning of security systems of objects of internal affairs bodies. Voronezh : Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of the Russian Federation, 2023. (In Russ)
8. Zhilin R.A. The space of signs of a violator of security systems of a general criminal orientation // Mathematical methods and information technologies in system modeling : Materials of the V All-Russian (national) scientific and practical conference, Voronezh, April 29, 2021. Voronezh: Publishing house "Scientific Book", 2021. (In Russ)
9. Wentzel E.S. Theory of random processes and its engineering applications / E.S. Wentzel, L.A. Ovcharov. – M.: Higher School, 1998; 354. (In Russ)
10. Matalytsky M.A. Elements of the theory of random processes: textbook. stipend. Grodno: GrSU, 2004; 326.. (In Russ)
11. Alekseev O.G., Anisimov V.G., Anisimov E.G. Markov models of combat. M.: Ministry of Defense of the USSR, 1985. (In Russ)
12. Koziratsky Yu.L., Kozlitsin S.N., Budnikov S.A. Modeling the joint use of electronic warfare and fire damage in the interests of increasing the effectiveness of the struggle for supremacy in management. Control systems, communications and security, 2020. (In Russ)
13. Burkov V.N., Korgin N.A. Models, methods and mechanisms of management and decision-making in organizational systems : a textbook. Moscow : Academy of IBS, 2009. (In Russ)
14. Barkalov S.A., Morozov V.P., Moiseev S.I. Modeling of the decision-making process based on Markov random processes. Mathematical methods and information technologies in system modeling : Materials of the V All-Russian (national) Scientific and Practical conference, Voronezh, April 29, 2021. Voronezh: Publishing House "Scientific Book", 2021. (In Russ)
15. Pleskunov M.A. Theory of mass service: textbook. Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Ural. feder. unT. Yekaterinburg: Ural Publishing House. unita, 2022. (In Russ)
16. Melnikov A.V., Karavaev A.A., Zheleznyakov A.O. Analysis of the main approaches to modeling management processes of organizational and technical systems for special purposes. Herald of the Dagestan State Technical University. Technical sciences. 2024;51(1):153-165. – DOI 10.21822/2073-6185-2024-51-1-153-165. (In Russ)
17. RF Patent No. RU 2 778 170 C1, MPK B64F 5/40, B64F 5/60, G06Q 10/06. A method of repairing aircraft equipment during operation in permanent locations. Zheleznyakov A.O., Sidorchuk V.P., 2021. (In Russ)

Сведения об авторах:

Железняков Артем Олегович, преподаватель; artem.artemov48@mail.ru

Жилин Роман Андреевич, кандидат технических наук, старший преподаватель, кафедра «Тактико-специальная подготовка»; zhilin99.zhilin@yandex.ru.

Information about authors:

Artem O. Zheleznyakov, Lecturer; artem.artemov48@mail.ru

Roman A. Zhilin, Cand. Sci. (Eng.), Senior lecturer, Department of Tactical and Special Training; zhilin99.zhilin@yandex.ru.

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 19.04.2024.

Одобрена после рецензирования/ Revised 20.05.2024.

Принята в печать/Accepted for publication 20.05.2024.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 004.42



DOI: 10.21822/2073-6185-2024-51-4-80-86

Оригинальная статья /Original article

**Разработка программного модуля автоматической коррекции чертежей,
полученных в результате обмена графическими данными между
САД-системами, на примере мебельного производства**
А.В. Калинин, А.Ю. Аликов, Т.А. Юрошева
Северо – Кавказский горно-металлургический институт
(Государственный технологический университет),
362021, Россия, г. Владикавказ, ул. Николаева, 44, Россия

Резюме. Цель. При проектировании сложных объектов, а также при необходимости выполнения операций экспорта-импорта между различными системами автоматизированного проектирования достаточно актуальной становится задача автоматической коррекции чертежей. Целью исследования является разработка программного модуля для автоматической коррекции чертежей в системе AutoCAD, необходимость которой обусловлена такими причинами, как: использование разных форматов файлов для хранения чертежей различными САПР, сложность чертежей. **Метод.** В рамках проведенного исследования были использованы методы геометрического моделирования, аналитической геометрии и графического представления результатов. **Результат.** Разработаны алгоритмы автоматической коррекции параметров положения и начертания фрагментов чертежа в системе AutoCAD, имеющие сложность $O(n)$ и $O(n^2)$. **Вывод.** Анализ функциональных возможностей разработанного модуля позволяет утверждать, что его использование способствует уменьшению временных затрат при коррекции в системе AutoCAD чертежей, полученных в результате импорта из других САД-систем, а также повышению качества конструкторской документации.

Ключевые слова: система автоматизированного проектирования, Visual Lisp, AutoCAD, DXF-формат

Для цитирования: А.В. Калинин, А.Ю. Аликов, Т.А. Юрошева. Разработка программного модуля автоматической коррекции чертежей, полученных в результате обмена графическими данными между САД-системами, на примере мебельного производства. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2024; 51(4):80-86. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-4-80-86

Software module for automatic correction of drawings obtained as a result of graphic data exchange between CAD systems, using the furniture production example

A.V. Kalinichenko, A.Yu. Alikov, T.A. Yurosheva

North Caucasus Mining and Metallurgical Institute (State Technological University)

44 Nikolaeva St., Vladikavkaz 362021, Russia

Abstract. Objective. When designing complex objects, as well as when it is necessary to perform export-import operations between various computer-aided design systems, the task of automatic correction of drawings becomes quite relevant. Development of a software module for automatic correction of drawings in the AutoCAD system, the need for which is due to reasons such as: the use of different file formats for storing drawings by different CAD systems, the complexity of the drawings. **Method.** As part of the study, methods of geometric modeling, analytical geometry and graphical presentation of results were used. **Result.** Algorithms for automatic correction of parameters of position and outline of drawing fragments in the AutoCAD system have been developed, with complexity of $O(n)$ and $O(n^2)$. **Conclusion.** Analysis of the

functionality of the developed module allows us to assert that its use will reduce the time spent when correcting drawings obtained as a result of import from other CAD systems in the AutoCAD system, and improve the quality of design documentation.

Keywords: computer-aided design system, Visual Lisp, AutoCAD, DXF format

For citation: A.V. Kalinichenko, A.Yu. Alikov, T.A. Yurosheva. Software module for automatic correction of drawings obtained as a result of graphic data exchange between CAD systems, using the furniture production example. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2024; 51(4):80-86. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-4-80-86.

Введение. На рынке систем автоматизированного проектирования существуют программные продукты, заточенные под решение задач различных отраслей производства, в том числе и мебельного. Обмен информацией между CAD-системами является важным аспектом работы инженеров. Необходимость выполнения процедур экспорта-импорта может быть обусловлена особенностями организации производства, например, работа с внешними партнерами или использование аутсорсинга, реализация проектов, в которых участвуют несколько организаций или подразделений, что требует обмена данными с системами, которые могут иметь разные стандарты и форматы.

Отметим наиболее распространенные форматы файлов, используемых для обмена данными между CAD-системами. DWG - формат, разработанный компанией Autodesk для ее программного обеспечения AutoCAD, DXF - формат файла, разработанный также компанией Autodesk, но уже для обмена данными между AutoCAD и другими программными продуктами. Международный стандарт STEP позволяет обеспечить обмен данными о геометрии, размерах и свойствах деталей и сборок. IGES - формат обмена данными, который поддерживает геометрию, разрезы и чертежи. Отметим также формат STL, часто использующийся для представления трехмерной геометрии контексте 3D-печати.

Большинство CAD-систем предоставляет функции импорта и экспорта данных в различных форматах. Однако не все CAD-системы полностью совместимы друг с другом, и иногда может потребоваться конвертация данных или использование дополнительных инструментов для обеспечения корректного обмена информацией, например, с помощью API (Application Programming Interface), позволяющего взаимодействовать с другим программным обеспечением на более низком уровне. Ряд систем автоматизированного проектирования предоставляют широкие возможности для разработки собственных программных модулей, расширяющих их функционал. Так, примеры адаптации AutoCAD под прикладные задачи пользователей рассмотрены в работах [1-3].

Расширение функционала системы автоматизированного проектирования на примере мебельного производства может включать в себя следующие аспекты:

1. Автоматизация чертежей: создание скриптов для быстрого построения деталей мебели, таких как столешницы, ножки, дверцы и т. д.
2. Генерация отчетов: автоматическое создание отчетов о количестве деталей, материалов и других данных, необходимых для производственного процесса.
3. Оптимизация раскроя: разработка скриптов для расчета оптимального раскроя материалов, что позволит минимизировать отходы и снизить затраты.
4. Интеграция с системами управления данными: создание скриптов для обмена данными между CAD-системой и системами управления данными (ERP, PDM и т. д.), что обеспечит более эффективное управление проектами и производством.
5. Создание пользовательских инструментов: разработка специализированных инструментов и функций, адаптированных к специфическим потребностям мебельного производства.

Постановка задачи. В настоящей работе рассмотрены вопросы, связанные с автоматической коррекцией в системе AutoCAD чертежей, полученных в результате импорта из системы автоматизированного проектирования SolidWorks.

Анализ показал, что сложности при экспорте и импорте чертежей между различными системами автоматизированного проектирования обусловлены такими причинами, как:

- использование разных форматов файлов для хранения чертежей различными САПР. Нужно отметить, что каждый формат имеет свои особенности и ограничения, что может вызвать проблемы при импорте или экспорте чертежей;
- использование проприетарных форматов. Ряд систем автоматизированного проектирования имеют собственные форматы файлов, которые могут не поддерживаться другими системами, что, в свою очередь, может потребовать дополнительных действий для преобразования чертежей в другие форматы;
- сложность чертежей. Сложные чертежи могут содержать специфические объекты, стили, слои или информацию о свойствах, которые могут не поддерживаться в других системах, это также может вызвать трудности при импорте и экспорте таких чертежей.

В исследовании [4] представлены результаты тестов совместимости между системами, основанных на проверке геометрических моделей и их атрибутов после импорта/экспорта 2D и 3D объектов с использованием распространенных форматов обмена данными. Тесты и анализ проводились в выбранных форматах в зависимости от типа объекта, таких как 2D-объекты (DXF), твердые объекты (IGES, STEP, SAT и PARASOLID) и поверхностные объекты (IGES, STEP, SAT и X_T). Результаты исследования подтверждают необходимость постоянного развития систем CAD/CAE, поскольку текущие форматы не являются эффективными на 100%. Обозначенные выше факторы определили целесообразность проведения исследования, целью которого является разработка программного модуля для автоматической коррекции чертежей в системе AutoCAD, что позволит уменьшить временные затраты при коррекции чертежей, полученных в результате импорта из других CAD-систем, а также повысить качество конструкторской документации.

Методы исследования. В рамках проведенного исследования были использованы методы геометрического моделирования, аналитической геометрии и графического представления результатов.

Функционал программного модуля. Анализ чертежей, импортируемых в AutoCAD из системы автоматизированного проектирования SolidWorks, выявил необходимость внесения изменений в чертежи перед их дальнейшей передачей для разработки программ для станков с ЧПУ. С целью сокращения временных затрат при коррекции чертежей, а также повышения качества конструкторской документации разработан программный модуль, включающий в себя следующий функционал:

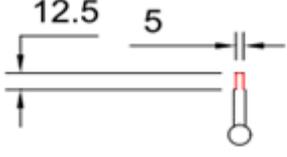
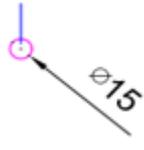
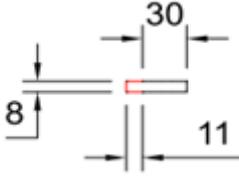
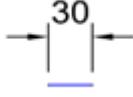
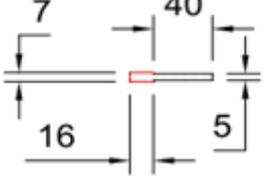
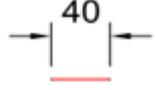
- алгоритм изменения у графических примитивов таких свойств как: тип и толщина линий и т.д.;
- алгоритм перемещения графических примитивов на новый слой с автоматическим созданием этого слоя;
- алгоритм построения графических примитивов «POLYLINE» с заменой участков, созданных с помощью нескольких примитивов «LINE»;
- алгоритм идентификации и замены некоторых фрагментов чертежа, на условные обозначения.

Примеры фрагментов чертежа, которые необходимо идентифицировать и заменять в импортированных чертежах, показаны в табл. 1. Дадим краткое описание реализованного функционала программного модуля. Разработка модулей для системы AutoCAD может быть выполнена с использованием различных языков программирования и библиотек, в том числе предоставляемых Autodesk. Например, Visual LISP - расширение языка AutoLISP, разработанного специально для AutoCAD, которое предоставляет интегрированную среду разработки (IDE) для более быстрой и эффективной разработки приложений AutoCAD. Набор библиотек ObjectARX на уровне базы данных позволяет создавать поль-

зовательские объекты, команды и системные функции, которые могут быть интегрированы в среду AutoCAD.

Таблица 1. Примеры фрагментов чертежа, подлежащих идентификации и замене в импортированных чертежах

Table 1. Examples of drawing fragments to be identified and replaced in imported drawings

Фрагменты чертежа, которые необходимо идентифицировать Drawing fragments that need to be identified	На что требуется заменить What needs to be replaced
	
	
	

Стоит отметить, что AutoCAD предоставляет API для .NET Framework, который позволяет разработчикам создавать приложения на основе .NET, используя такие языки программирования, как C# или VB.NET. Этот API предоставляет доступ к функциям AutoCAD на более высоком уровне абстракции, чем ObjectARX.

Учитывая, что обозначенные выше основные виды требующихся правок связаны с изменением информации о примитивах, было решено выбрать интегрированную среду разработки Visual LISP для разработки модуля. Удобный доступ к примитивам чертежа позволяет получить использование DXF кодов. Например, в работе [5] рассмотрены вопросы разработки алгоритмического обеспечения автоматической коррекции линейных размерных обозначений, устанавливаемых в описаниях конструкторских чертежей деталей, форма и параметры которых изменяются в соответствии со значениями, задаваемыми конструктором с целью получения модифицированных образов при разработке новых вариантов изделий. В основу корректировки положено использование сеточной параметрической модели исходного чертежа детали прототипа, представленного в векторном виде в DXF-файле.

Авторами работы [6] предложен универсальный алгоритм преобразования геометрических моделей в параметрические, базирующийся на анализе DXF-файлов. В работе [7] описан алгоритм автоматической корректировки описания осевых полилиний симметрии деталей постоянной ширины, имеющих изогнутую форму, реализация которого основывается на выполнении последовательности операций над описанием каждого сегмента полилинии симметрии исходного DXF- файла чертежа. DXF файлы содержат информацию о примитивах, таких как линии, круги, полилинии и другие объекты, которые используются для создания чертежей в AutoCAD. Использование DXF кодов позволяет представить всю информации, содержащуюся в файле чертежа AutoCAD, в виде помеченных данных. Формат помеченных данных означает, что перед каждым элементом данных в файле ставится целое число, которое называется групповым кодом. Значение группового кода указывает на тип следующего за ним элемента данных. Это значение также указывает значение элемента данных для данного типа объекта (или записи). Практически

вся заданная пользователем информация в файле чертежа может быть представлена в формате DXF. Пример DXF-кода для полилинии показан на рис. 1.

```
((-1 . <Имя объекта: 7ffffb19880>) (0 . "LWPOLYLINE") (330 . <Имя объекта: 7ffffb069f0>)
(5 . "2C58") (100 . "AcDbEntity") (67 . 0) (410 . "Model") (8 . "0") (100 .
"AcDbPolyline") (90 . 5) (70 . 0) (43 . 0.0) (38 . 0.0) (39 . 0.0) (10 3085.73 -3967.35)
(40 . 0.0) (41 . 0.0) (42 . 0.0) (91 . 0) (10 4188.25 -3967.35) (40 . 0.0) (41 . 0.0)
(42 . 0.0) (91 . 0) (10 4188.25 -4575.84) (40 . 0.0) (41 . 0.0) (42 . 0.0) (91 . 0) (10
3038.48 -4575.84) (40 . 0.0) (41 . 0.0) (42 . 0.0) (91 . 0) (10 3038.48 -4208.65) (40 .
0.0) (41 . 0.0) (42 . 0.0) (91 . 0) (210 0.0 0.0 1.0))
```

Рис. 1. Пример DXF-кода для полилинии

Fig. 1. Example of DXF code for a polyline

Фактически для выполнения любой из операций, обозначенных выше, прежде всего требуется уметь идентифицировать фрагменты чертежа. Для фрагментов, состоящих из одного примитива, эта задача не представляет сложности и решается с помощью функции фильтрации с указанием нужного значения DXF-кода и кодов, задающих, например, радиус окружности или координаты начала и конца линии. Если же фрагмент состоит из нескольких примитивов, то процедура идентификации этих фрагментов чертежа осложняется тем, что они не являются блоками, а также могут быть расположены под разными углами. Поэтому для однозначной идентификации обозначенных в табл.1 фрагментов чертежа был использован аппарат аналитической геометрии, в частности, формулы поворота для описания преобразования координат точек на плоскости при повороте системы координат на определенный угол, формулы для проверки перпендикулярности прямых и принадлежности точек одной прямой.

После успешной идентификации фрагментов им могут быть изменены с помощью DXF-кодов такие свойства, как слой, тип и толщина линий и т.д. Также эти фрагменты могут быть удалены из чертежа и вместо них программно добавлены в чертёж новые обозначения, необходимые проектировщику. На рис. 2 продемонстрированы результаты работы алгоритма автоматической идентификации и замены фрагментов чертежа: слева показан импортированный фрагмент чертежа, а справа - результат, полученный после автоматической замены.

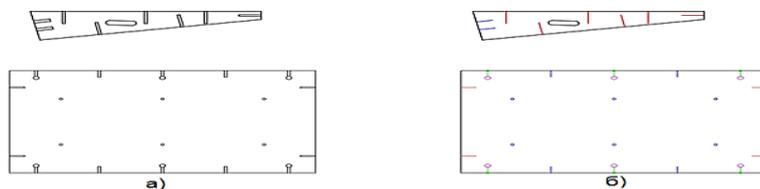


Рис. 2. Результаты работы модуля: а) импортированный фрагмент чертежа,

б) результат, полученный после автоматической коррекции

Fig. 2. Results of the module's work: a) imported drawing fragment,

b) result obtained after automatic correction

В некоторых случаях после импорта вместо одного отрезка с началом в точке $PStart$, концом в точке $Pend$ и углом наклона относительно положительного направления оси OX , равным α , появлялось несколько отрезков $line_i$, $i=1, \dots, n$, с началом в точке $Pstart_i$, концом в точке $Pend_i$ и углом наклона относительно положительного направления оси OX , равным α , для которых:

$$\begin{aligned} Pend_{i-1} &= Pstart_i \text{ для любого } i=2, \dots, n, \\ Pstart_1 &= PStart, \\ Pend_n &= Pend. \end{aligned}$$

Рассмотрим основные шаги алгоритма, позволяющего идентифицировать в чертеже отрезки $line_i$, $i=1, \dots, n$, удовлетворяющие обозначенным выше условиям, заменить их на один отрезок.

Шаг 1. Выявляются все графические примитивы чертежа, соответствующие отрезкам, то есть в DXF-списках которых для DXF-кода 0 указано значение «LINE».

Шаг 2. Для каждого выявленного отрезка в его DXF-списке определяются координаты начала и конца (они имеют DXF-код 10 и 11 соответственно).

Шаг 3. В цикле по выявленным примитивам отрезков путем попарного сравнения координат точек начала и конца определяем пары отрезков $line_i$ и $line_j$, у которых совпадают координаты одной из конечных точек (обозначим координаты этой точки через p , координаты другого конца $line_i$ - через p_1 , для $line_j$ - через p_2) и совпадает угол наклона этих отрезков относительно положительного направления оси OX.

Шаг 4. В DXF-списке отрезка $line_i$ в точечной паре, соответствующей точке p (она будет иметь DXF-код, равный 10 или 11), заменяем координаты точки p на координаты точки p_2 .

Шаг 5. Отрезок $line_j$ удаляем.

В ряде случаев в полилиниях появлялись «лишние» вершины, в которых не происходило изменение угла звена ломаной по сравнению с углом наклона относительно положительного направления оси OX предыдущего звена той же ломанной. Также наблюдался следующий дефект: отрезки, которые должны были быть звеньями одной ломанной, фактически являлись отдельными отрезками, имеющими тип «LINE». Был разработан модуль, который позволяет обнаружить на чертеже обозначенные выше дефекты, и автоматически заменить их на один примитив «POLYLINE», рассчитав необходимое количество звеньев ломаной и значения их координат. На рис. 3(а) показан пример чертежа, в котором внешний контур образован из отдельных девяти примитивов «LINE», после преобразования внешний контур представляет собой замкнутую полилинию, как показано на рис. 3(б).

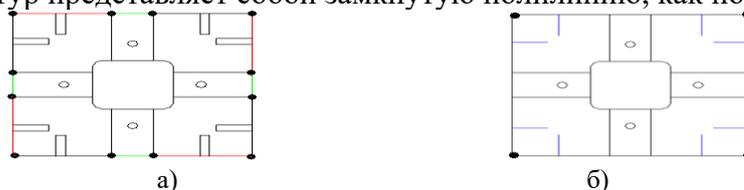


Рис. 3. Пример преобразования полилиний: а) внешний контур образован из отдельных девяти примитивов «LINE», б) внешний контур представляет собой замкнутую полилинию
Fig. 3. Example of polyline transformation: a) the outer contour is formed from nine separate “LINE” primitives, b) the outer contour is a closed polyline

Обсуждение результатов. Разработанные алгоритмы имеют сложность $O(n)$ и $O(n^2)$ и позволяют существенно снизить временные затраты на корректировку чертежей, связанную с несовершенством процедур экспорта-импорта между SolidWorks и AutoCAD и специфическими потребностями компаний мебельного производства.

Относительно масштабируемости предлагаемого решения можно отметить следующее. Существует ряд CAD систем, поддерживающих язык VisualLisp или AutoLisp, например, BricsCAD или NanoCAD. BricsCAD, как современная и многофункциональная CAD-платформа, поддерживает расширение функциональности через различные языки программирования, включая Visual LISP. Однако, важно понимать, что поддержка Visual LISP в BricsCAD может быть не полной и не все функции и команды AutoCAD, используемые в LISP-скриптах, могут быть доступны в BricsCAD. Система автоматизированного проектирования NanoCAD также поддерживает некоторые функции AutoLISP. Однако, как и в случае с BricsCAD, программы, написанные на AutoLISP, могут быть частично совместимы с NanoCAD. Следует отметить, что NanoCAD имеет свои собственные API и возможности для расширения функциональности.

Вывод. Предложен алгоритм автоматической коррекции параметров положения и начертания фрагментов чертежа, обозначенных заказчиком. В соответствии с представленным алгоритмом возможна разработка алгоритмов, позволяющих автоматически модифицировать обозначения других типов. Анализ функциональных возможностей разработанного модуля позволяет утверждать, что его использование позволит уменьшить временные затраты при коррекции чертежей, полученных в результате импорта из других CAD-систем, повысить качество конструкторской документации.

Библиографический список:

1. Юрошева Т.А., Калининченко А.В., Макиев В.Г. Алгоритм проектирования несущих конструкций многоэтажного здания с использованием визуального программирования DYNAMO STUDIO//Вестник Дагестанского государственного технического университета. 126-133. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-4-126-133.
2. Калининченко 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.
3. Калининченко А.В. Автоматизированное проектирование сетей внутреннего водоотведения с применением системы AutoCAD // Инженерный вестник Дона. 2017. № 3 (46). С. 105.
4. Kurylo P., Frankovský P., Malinowski M., Maciejewski T., Varga J., Kostka J., Adrian Ł., Szufa S., Rusnáková S. Data Exchange with support for the neutral processing of formats in computer-aided design/computer-aided manufacturing systems//Applied Sciences (Switzerland). 2023;13(17):9811. <https://doi.org/10.3390/app13179811>
5. Мусаид А.М.О., Лячек Ю.Т., Мустафа А.Б.М. Алгоритмическое обеспечение коррекции линейных размерных обозначений при модификации чертежей // Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям. 2018. Т. 1. С. 681-683.
6. Барабанов В.Ф., Гребенникова Н.И., Нужный А.М., Сафронов В.В. Разработка модуля параметрического построения моделей на базе AutoCAD // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2017. № 3. Т. 13. С. 12-19.
7. Лячек Ю.Т., Мустафа А.Б.М. Алгоритм модификации осей симметрии деталей, описываемых полилиниями // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: естественные и технические науки. 2019. №5. С. 86-91.

References:

1. Yurosheva T.A., Kalinichenko A.V., Makiev V.G. Algorithm for designing load-bearing structures of a multi-story building using the DYNAMO STUDIO visual programming environment. *Herald of the Dagestan State Technical University. Technical Sciences.* 2022; 49(4):126-133. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-4-126-133. (In Russ)
2. Kalinichenko A.V. On expanding the functionality of the AutoCAD system using the example of automating the design of water supply for residential buildings. *Science and business: development paths.* 2016;. 6 (60);12-15. (In Russ)
3. Kalinichenko A.V. Automated design of internal water drainage networks using the AutoCAD system. *Engineering Bulletin of the Don.* 2017;3 (46):105. (In Russ)
4. Kurylo P., Frankovský P., Malinowski M., Maciejewski T., Varga J., Kostka J., Adrian Ł., Szufa S., Rusnáková S. Data Exchange with support for the neutral processing of formats in computer-aided design/computer-aided manufacturing systems. *Applied Sciences (Switzerland).* 2023;13(17):9811. <https://doi.org/10.3390/app13179811>
5. Musaid A.M.O., Lyachek Yu.T., Mustafa A.B.M. Algorithmic support for the correction of linear dimensional designations when modifying drawings. *International Conference on Soft Computing and Measurements.* 2018;1 681-683. (In Russ)
6. Barabanov V.F., Grebennikova N.I., Nuzhny A.M., Safronov V.V. Development of a module for parametric construction of models based on AutoCAD. *Bulletin of the Voronezh State Technical University.* 2017; 31. (3):12-19. (In Russ)
7. Lyachek Yu.T., Mustafa A.B.M. Algorithm for modifying the axes of symmetry of parts described by polylines. *Modern science: current problems of theory and practice. Series: natural and technical sciences.* 2019;5: 86-91. (In Russ)

Сведения об авторах:

Калининченко Алла Викторовна, кандидат технических наук, доцент; kalinichenkoalla@mail.ru

Аликов Алан Юрьевич, кандидат технических наук, доцент; alan@alikov.ru

Юрошева Татьяна Александровна, кандидат технических наук, доцент; trini-83@yandex.ru

Information about authors:

Alla V. Kalinichenko, Cand. Sci. (Eng.), Assoc.Prof., kalinichenkoalla@mail.ru

Alan Yu. Alikov, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof.; alan@alikov.ru

Tatiana A. Yurosheva, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., trini-83@yandex.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 11.06.2024.

Одобрена после рецензирования/ Reved 20.08.2024.

Принята в печать/Accepted for publication 30.11.2024.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК004.056.5:621.398.96



DOI: 10.21822/2073-6185-2024-51-4-87-98 Оригинальная статья /Original article

**Системный анализ и обработка информации для задачи выявления поломки
информационного накопителя компьютера**

Н.М. Кодацкий, Е.А. Ревякина, А.Р. Газизов

Донской государственной технической университет,
344002, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1, Россия

Резюме. Цель. Одним из важных аспектов поддержания эффективной работы информационных систем является состояние оборудования компьютеров. Цель исследования заключается в описании метода эффективного системного анализа состояния информационного накопителя компьютера. **Метод.** Исследование основано на использовании алгоритмов машинного обучения для анализа и интерпретации данных, полученных из SMART-тестов. Включает в себя комплексный анализ и экспериментальное исследование. Представляет собой проведение экспериментов с набором данных и облачной средой Google Colab, создание и анализ модели машинного обучения, оценку эффективности и качества обучения. **Результат.** Разработан инструмент оценки состояния компьютерного оборудования на основе алгоритма Случайного леса, используя исторические данные SMART-тестов. **Вывод.** Результат данной работы не только позволяет внедрять рабочий инструмент анализа данных в сферу обслуживания компьютерного оборудования, но и предлагает практический пример использования для повышения надежности и эффективности работы информационных систем. Результаты исследования могут быть полезны как для ИТ-специалистов, ответственных за техническую поддержку, так и для организаций, стремящихся оптимизировать процессы обслуживания оборудования и улучшить свою конкурентоспособность на рынке.

Ключевые слова: информационные технологии, надежность, производительность, инновационные методы, мониторинг, прогнозирование, оборудование, SMART-тесты, модель оценки, случайный лес, риск, отказ, анализ данных, повышение эффективности

Для цитирования: Н.М. Кодацкий, Е.А. Ревякина, А.Р. Газизов. Системный анализ и обработка информации для задачи выявления поломки информационного накопителя компьютера. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2024; 51(4):87-98. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-4-87-98

**System analysis and information processing to solve the problem of detecting breakdowns
of computer information storage**

N.M. Kodatsky, E.A. Revyakina, A.R. Gazizov

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

Abstract. Objective. One of the important aspects of maintaining the efficient operation of information systems is the condition of computer equipment. The purpose of the study is to describe a method for effective system analysis of the state of a computer's information storage device. **Method.** The study is based on the use of machine learning algorithms to analyze and interpret data obtained from SMART tests. Includes a comprehensive analysis and experimental study. It involves conducting experiments with a data set and the Google Colab cloud environment, creating and analyzing a machine learning model, and evaluating the effectiveness and quality of training. **Result.** A tool for assessing the state of computer equipment based on the Random Forest algorithm has been developed using historical data from SMART tests. **Conclusion.** The results not only allow the implementation of a working data analysis tool

in the field of computer equipment maintenance, but also contain a practical example of increasing the reliability and efficiency of information systems. The results are useful for IT specialists and for organizations optimizing equipment maintenance processes and increasing competitiveness.

Keywords: information technology, reliability, performance, innovative methods, monitoring, forecasting, equipment, SMART tests, evaluation model, random forest, risk, failure, data analysis, efficiency improvement

For citation: N.M. Kodatsky, E.A. Revyakina, A.R. Gazizov. System analysis and information processing to solve the problem of detecting breakdowns of computer information storage. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2024;51(4):87-98. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-4-87-98

Введение. Причинами потери данных могут быть не только «человеческие ошибки, кибератаки», но и «поломки оборудования» [1,3], включая компьютеры и другие устройства хранения информации, которые гораздо чаще происходят даже в штатном режиме [2,12]. Одним из основных факторов потери данных является поломка оборудования компьютеров [3]. Одним из главных устройств компьютера, относительно хранения информации, является его накопитель, без которого просто невозможно оперировать информацией. Принято считать, что компьютерное оборудование – это стандартизированные устройства, которые «должны работать с удовлетворимым коэффициентом амортизации элементов» и минимальным, но «достаточным временем наработки на отказ» [2].

Постановка задачи. Существуют различные факторы, которые могут привести к неисправности средств вычислительной техники. В этой связи, важно иметь «систему контроля состояния оборудования» [1], чтобы предотвратить потерю данных и обеспечить непрерывность работы компьютерной системы.

Методы исследования. Одним из эффективных методов решения данной проблемы является использование интеллектуальных методов прогнозирования выхода из строя различных устройств. Современные «интеллектуальные методы оценки состояния оборудования компьютеров», использующие «машинное обучение и искусственный интеллект» [1], могут помочь определить вероятность возникновения поломки оборудования до того, как она произойдет. Так можно выполнить профилактические меры и заменить неисправное оборудование, прежде чем оно приведет к потере данных, что делает исследование актуальным.

В качестве решения поставленной цели будут использоваться современные инструменты и подходы, такие как облачные вычисления Google Cloud, включая Python и библиотеки машинного обучения, такие как Scikit-learn, а также другие библиотеки для работы с данными и их оперированием, такие как Numpy и Pandas. В работе также будут использованы данные и результаты экспериментов, полученные на реальных компьютерных системах. Результаты данной работы представляют собой значимый вклад в область информационной безопасности и технологий. Применимость работы распространяется на различные сферы общества, включая бизнес, науку, медицину и другие области, где широко используется компьютерная техника [12, 16]. Полученные результаты позволяют разработать и реализовать собственный отечественный метод мониторинга состояния информационных накопителей для предприятий по результативности не хуже зарубежных аналогов. Такой подход к проблеме обеспечения безопасности данных и контроля за хранением информации может заменить использование зарубежных аналогов с закрытым исходным кодом. Исследование способствует укреплению информационной безопасности организаций [11, 12] и дает возможность иметь более надежные инструменты для контроля за информационными ресурсами в контексте сложных политических обстоятельств и геополитических взаимоотношений с сфере продуктов и разработок.

Ручной анализ данных. Жесткие диски (ЖД) являются одним из наиболее распространенных устройств хранения данных в компьютерах и серверах. Они играют ключевую роль в сохранении, доступе и обработке информации. В связи с этим, понимание состоя-

ния и производительности жестких дисков имеет важное значение для эффективного функционирования компьютерных систем. Для оценки состояния и работы жестких дисков используется различная статистика, включая показатели SMART (Self-Monitoring, Analysis, and Reporting Technology). SMART представляет собой технологию, которая «позволяет мониторить и анализировать работу дискового устройства, предупреждать о возможных проблемах и предсказывать отказы» [7]. Изучение статистики SMART является важным аспектом для эффективного управления и поддержки жестких дисков. Понимание того, что эти показатели говорят о состоянии диска, «позволяет принять своевременные меры для предотвращения потери данных и снижения риска отказа системы» [7]. Анализ статистики SMART имеет также существенное значение в области информационной безопасности. Определение состояния жесткого диска с помощью показателей SMART позволяет выявить потенциальные проблемы, связанные с целостностью данных или возможными нарушениями безопасности. Использование статистики SMART не только способствует эффективному управлению жесткими дисками, но также играет важную роль в обеспечении информационной безопасности и защите данных от потенциальных угроз. Каждый диск включает в себя технологию самоконтроля, анализа и отчетности (SMART), которая предоставляет внутреннюю информацию о диске. SMART представляет систему мониторинга, встроенную в жесткие диски, которая сообщает о различных атрибутах состояния данного диска. Доступно более 70 статистических данных SMART, но для задачи прогнозирования поломки ЖД будет достаточно знать только пять. Описание атрибутов представлено в табл. 1 [7, 5]. Когда значение одного из этих атрибутов больше нуля, возникает повод обратить на это внимание.

Таблица 1. Атрибуты SMART-теста и его описание
Table 1. SMART test attributes and its description

Атрибут/ Attribute	Описание/ Description
SMART 5	Количество перераспределенных секторов/ Reallocated Sectors
SMART 187	Сообщенные о неисправимых ошибках/ Reported Uncorrectable Errors
SMART 188	Прерывание команды/ Command Abort
SMART 197	Текущее количество ожидающих секторов/ Current Pending Sectors
SMART 198	Неисправимое количество секторов/ Uncorrectable Sectors

Также «необходимо отслеживать состояние RAID-массива для выявления потенциальных проблем с диском» [6]. Эти инструменты обычно сообщают только об исключениях, поэтому в любой момент количество расследований можно контролировать, даже несмотря на значительное количество ЖД. Согласно статистике, предоставляемой компанией Backblaze Vault [8], по анализу состояния ЖД (табл. 2), можно сказать, что процент рабочих ЖД, у которых один или несколько из пяти показателей SMART больше нуля составил 4,2 %, когда неисправные диски по тем же показателям больше нуля составили 76,7 %.

Таблица 2. Процент неисправных и работающих дисков по выделенным атрибутам [4]
Table 2. Percentage of faulty and working hard drives by selected attributes [4]

Состояние ЖД HDD status	SMART 5	SMART 187	SMART 188	SMART 197	SMART 198
Исправны/ Good	1,1%	0,5 %	4,8 %	0,7 %	0,3 %
Неисправны/ Faulty	42,2 %	43,5%	44,8%	43,1 %	33 %

Наличие данного показателя со значением, превышающим ноль, в данный момент может ничего не значить. Например, диск может иметь необработанное значение SMART 5, равное двум, что означает, что два сектора диска были переназначены. Сама по себе такая ценность мало что значит, пока она не будет объединена с другими факторами. В процессе оценки «может потребоваться изрядное количество интеллекта» (как человеческого, так и искусственного), чтобы прийти к выводу о том, «что операцион-

ный двигатель выйдет из строя» [9, 7]. Единственный способ, который помогает – наблюдаются несколько ошибок SMART.

Рассмотрим корреляцию между наблюдаемыми атрибутами в табл. 3 [9]. Табл. 3 отражает взаимоотношение между рассматриваемыми атрибутами, что, помогает в определении, какие конкретные параметры SMART в большей степени связаны друг с другом, а также выявляет противоречия или зависимости между различными атрибутами.

Таблица 3. Корреляция между статистическими данными атрибутов SMART

Table 3. Correlation between SMART attribute statistics

	SMART 5	SMART 187	SMART 188	SMART 197	SMART 198
SMART 5	1	0,034	0,026	0,064	0,043
SMART 187	0,034	1	0,007	0,025	0,033
SMART 188	0,026	0,007	1	0	0,006
SMART 197	0,064	0,025	0	1	0,808
SMART 198	0,043	0,033	0,006	0,808	1

В большинстве случаев статистика мало коррелирует и может считаться независимой. Только SMART 197 и 198 имеют хорошую корреляцию [7], то есть их можно рассматривать как один индикатор вместо двух. Но целесообразно продолжать собирать эти статистики вместе по двум причинам: «корреляция не идеальна», поэтому есть место для ошибок и «не все производители накопителей сообщают об обоих атрибутах» [9].

Понимание корреляции или ее отсутствия может помочь в принятии решения как поступать с ЖД. Например, накопитель сообщил о необработанном значении SMART 5, равном 10, и необработанном значении SMART 197, равном 20. Из этого исходит, что ЖД изнашивается и его следует его заменить. Принимая во внимание, что, если тот же диск имел необработанное значение SMART 197, равное 5, и необработанное значение SMART 198, равное 20, и никаких других ошибок, можно было бы отложить замену диска, ожидая получения дополнительных данных, таких как частота возникновения ошибок. Статистика SMART, приведенная выше, за исключением SMART 197, носит накопительный характер, то есть необходимо учитывать период времени, в течение которого были зарегистрированы ошибки, а не просто количество показателей, отличных от нуля.

Правильное использование статистики SMART требует систематического мониторинга и анализа показателей. Регулярный контроль состояния дисков и применение рекомендаций по использованию статистики SMART позволяют повысить надежность системы и обеспечить безопасность хранения данных. Понимание значения и применения статистики SMART является неотъемлемой частью управления и поддержки жестких дисков. Анализ показателей SMART помогает предотвращать потерю данных, предупреждать о возможных проблемах и улучшать безопасность системы. Использование данной информации позволяет принять своевременные меры и обеспечить надежную работу компьютерных систем в условиях быстро меняющейся информационной среды.

Данные для обучения. Одним из эффективных методов решения исследуемой проблемы является использование интеллектуальных методов прогнозирования выхода из строя различных устройств. Цель данного раздела заключается в обоснование эффективности интеллектуального метода оценки состояния оборудования компьютера с использованием алгоритма Случайного Леса (Random Forest) и подходов Bagging и Boosting для предотвращения потери данных на информационных накопителях компьютера.

Источником данных выступает операционная система устройства (Windows или Linux), а именно следующие источники системы: технологии мониторинга SMART-атрибутов (smartmontools или CrystalDiskInfo), журнал событий операционной системы и утилиты командной строки. Наибольший интерес для определения выхода из строя жесткого диска представляют 5 атрибутов данных SMART-статистики, а именно [9]:

- SMART 5 – количество перераспределенных секторов;
- SMART 187 – сообщения об неисправностях;

- SMART 188 – требуемое время на ожидание команд;
- SMART 197 – текущее количество секторов в режиме ожидания;
- SMART 198 – количество некорректируемых секторов.

Для более корректного обучения модели было принято решение воспользоваться собранными необработанными тестовыми данными жестких дисков за 2022 – 2023 года от компании Backblaze, использующих эти данные в своих центрах обработки 67 814 жестких дисков. [9]. Для сбора данных SMART-статистики компания использует Smartmontools [5]. Сбор производится один раз в день для каждого жесткого диска.

Таким образом, «добавляются несколько элементов», таких как модель диска, серийный номер и т. д., и «создается строка в ежедневном журнале для каждого диска» [10]. Диски, которые вышли из строя, помечаются как таковые, и их данные больше не регистрируются. Иногда «диски удаляются из эксплуатации», даже если он не вышел из строя, например, когда компания «обновляет Storage Pod», заменяя диски емкостью 1 ТБ на диски емкостью 4 ТБ [9]. В этом случае диск объемом 1ТБ не помечается как неисправный, но данные SMART больше не регистрируются. Каждый день центр обработки данных Backblaze делает снимок каждого работающего жесткого диска своего исследовательского центра. Этот «набор данных включает основную информацию о диске», а также его статистику SMART [9, 10]. Ежедневный снимок одного диска - это «одна запись или строка данных». Все снимки дисков за определенный день собираются в файл, состоящий из строк для каждого активного жесткого диска. Этот файл имеет формат «*.csv» (значения, разделенные запятыми). Так, каждый день формируется файл с названием в формате ГГГГ-ММ-ДД.csv, например, 2023-07-01.csv и имеет следующую структуру [8]:

1. первая строка каждого файла содержит имена столбцов, остальные строки - это исторические данные состояния накопителя.
2. столбцы содержат следующую информацию:
 - дата - дата файла в формате гггг-мм-дд;
 - серийный номер - серийный номер диска, присвоенный производителем;
 - модель - номер модели привода, присвоенный производителем;
 - емкость - емкость диска в байтах;
 - сбой - содержит «0», если диск в порядке. Содержит «1», если это последний день работы диска перед сбоем.

Выбор интеллектуального метода. Для задачи прогнозирования поломки жестких дисков на основе размеченных данных SMART можно использовать различные алгоритмы машинного обучения. Каждая модель имеет свои преимущества и недостатки, и выбор конкретной модели зависит от специфики задачи, доступности данных, требований к точности и интерпретируемости. Мною были выделены некоторые из подходящих:

1. Случайный лес (Random Forest). Способен достичь высокой точности и устойчивости к переобучению благодаря ансамблю деревьев решений. Может обрабатывать большие объемы данных с множеством признаков. Возможна оценка важности признаков, что полезно для понимания, какие атрибуты SMART наиболее влияют на выход из строя. Но такие модели на реальных и глобальных задачах могут быть достаточно сложными и требовать значительных вычислительных ресурсов для обучения и предсказаний. А ее интерпретируемость может быть ниже, чем у некоторых других подходов.
2. Градиентный бустинг (Gradient Boosting). Одна из наиболее мощных и широко используемых техник, которая часто показывает высокую точность в задачах классификации и регрессии. Метод строит модель последовательно, что позволяет ему эффективно корректировать ошибки предыдущих моделей. К том же, требует тщательной настройки гиперпараметров для достижения оптимальной производитель-

ности. Может быть более подвержен переобучению по сравнению с случайным лесом при недостаточном количестве данных.

3. Логистическая регрессия. Проста в интерпретации результатов. Обладает быстрой скоростью обучения и предсказания по сравнению с более сложными моделями. Хорошо подходит для задач бинарной классификации. Однако, предполагает линейную зависимость между признаками и целевой переменной, что может не всегда быть верным для данных SMART.
4. Метод опорных векторов (SVM). Эффективны в высокоразмерных пространствах и при наличии четкого разделения классов. Обладают версатильностью (способность обрабатывать широкий спектр данных) благодаря различным ядрам для обработки нелинейных зависимостей, но требуют интенсивных вычислений при больших объемах данных, а выбор и настройка ядра могут значительно повлиять на производительность модели.

Нами была выбрана модель случайного леса (Random Forest) для предсказания поломки жесткого диска на основе размеченных данных SMART тестов. На наш взгляд, это мощный алгоритм, который объединяет преимущества множества деревьев решений для повышения точности и устойчивости модели. Случайный лес хорошо справляется с большими наборами данных и может автоматически учитывать важность признаков, что делает его особенно подходящим для анализа данных SMART. Случайный лес является ансамблевым методом, который строит множество деревьев решений при обучении и выдает средний прогноз для классификации или регрессии. Это позволяет достигнуть высокой точности предсказаний, снижая при этом риск переобучения благодаря механизмам случайности при выборе признаков и образцов для построения деревьев. Данные SMART тестов часто включают множество различных атрибутов, отражающих состояние жестких дисков. Случайный лес может эффективно обрабатывать такие наборы данных, автоматически определяя наиболее значимые признаки для предсказания отказов. Одним из основных принципов работы такого алгоритма является использование подвыборок признаков для каждого дерева, что позволяет снизить влияние нерелевантных или слабо влияющих на целевую переменную признаков и увеличить общую точность модели. Хотя сама по себе модель случайного леса может казаться менее интерпретируемой по сравнению с одиночным деревом решений, она предоставляет полезную информацию о важности признаков. Понимание того, какие атрибуты SMART наиболее влияют на прогнозы, может быть важно для дальнейшего анализа и понимания причин отказов жестких дисков.

Эффективное использование алгоритма Random Forest с подходами Bagging и Boosting предоставляет «значительные возможности для прогнозирования» [13 - 15] выхода из строя оборудования компьютеров и предотвращения потенциальной потери данных. Этот комбинированный подход объединяет преимущества методов Bagging (усреднение результатов множества моделей) и Boosting (адаптивное взвешивание ошибок моделей), что способствует созданию надежных и точных моделей. Такой подход позволяет построить сильный классификатор, который «способен адаптироваться к различным данным и условиям» [13], повышая точность предсказаний. Подходы Bagging и Boosting улучшают обобщающую способность модели, позволяя ей эффективно обрабатывать сложные данные и быстро реагировать на изменения в состоянии оборудования.

К преимуществам алгоритма отнесем [13]:

- имеет высокую точность прогнозирования (для большинства задач работает лучше линейных алгоритмов, а точность сравнима с точностью boosting);
- практически не имеет чувствительности к выбросам в данных из-за случайного сэмплирования выборок методом bootstrap;
- не чувствителен к масштабированию (любым монотонным преобразованиям) значений признаков, связано с выбором случайных подпространств;
- не требует тщательной настройки параметров, хорошо работает «из коробки»;

- способен эффективно обрабатывать данные с большим числом признаков и классов;
- редко переобучается, на практике добавление деревьев почти всегда только улучшает композицию (до определенного предельного уровня);
- хорошо работает с пропущенными данными, сохраняет хорошую точность, если большая часть данных пропущена;
- могут быть расширены до неразмеченных данных, что приводит к возможности делать кластеризацию и визуализацию данных, обнаруживать выбросы;
- можно легко распараллелить и масштабировать (увеличить число деревьев и их глубину). К недостаткам алгоритма отнесем [13]:
- в отличие от одного дерева, результаты случайного леса сложно интерпретировать;
- алгоритм работает хуже многих линейных методов, когда в выборке очень много разреженных признаков (тексты, bag of words);
- не умеет экстраполировать данные, в отличие от линейной регрессии;
- склонен к переобучению на некоторых задачах, где данные не сильно зашумлены;
- для данных, включающих категориальные переменные с различным количеством уровней, случайный лес предвзят в пользу признаков с большим количеством уровней: когда у признака много уровней, дерево будет сильнее подстраиваться именно под эти признаки, так как на них можно получить более высокое значение оптимизирующего функционала (информационный выигрыш);
- большой размер получающихся моделей, что требует $O(N \cdot K)$ памяти для хранения моделей, где K – число деревьев.

Выбор случайного леса для предсказания поломки жесткого диска на размеченном наборе данных SMART тестов обусловлен его способностью к обработке больших и сложных наборов данных, высокой точностью и устойчивостью к переобучению, а также возможностью интерпретации важности признаков. Эти качества делают случайный лес подходящим для задач, где требуется надежное и точное прогнозирование на основе большого количества признаков, как и в случае с данными SMART тестов жестких дисков. Комбинация таких методов не только обеспечивает высокую точность прогнозирования поломок оборудования, но и позволяет оперативно реагировать на любые изменения или неполадки, минимизируя вероятность серьезных сбоев. Такой подход обеспечивает стабильность работы компьютерных систем и обеспечивает высокий уровень безопасности данных, что является критически важным аспектом в современной информационной технологии и бизнес-среде.

Перейдем к реализации самой модели интеллектуального метода в задаче прогнозирования выхода из строя информационного накопителя компьютера.

Использование алгоритма Случайного леса в задаче прогнозирования выхода из строя информационного накопителя компьютера. Отобразим матрицу диаграмм рассеивания (рис. 1), чтобы установить зависимости между 5-ю параметрами SMART используемого набора данных.

Каждая диагональ матрицы показывает распределение одного параметра, а вне диагонали - диаграммы рассеивания для каждой пары параметров. Заметим, что как было описано ранее, данные 5 и атрибутов тесно связаны друг с другом и коррелируют. Важно отметить, что для обучения из набора данных [7] останутся только значения, обладающие высокой корреляцией на отказ и размеченные для них метки классов: SMART 5 – количество перераспределенных секторов; SMART 187 – сообщенные о неисправимых ошибках; SMART 188 – тайм-аут команды; SMART 197 – количество текущих ожидающих секторов; SMART 198 – количество неисправных секторов. Метка класса состояния диска (0 – вышедший из строя, 1 – функционирующий исправно).

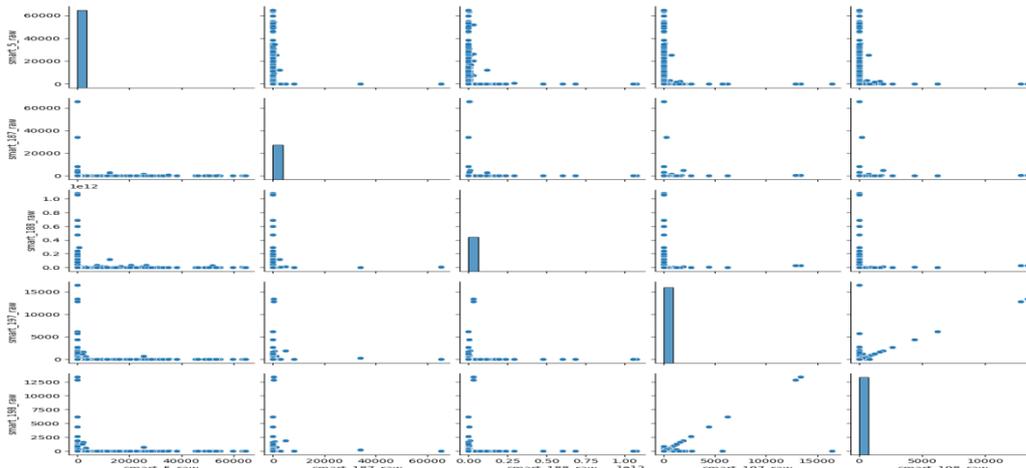


Рис. 1. Матрица рассеивания 5 SMART атрибутов тренировочной выборки
Fig. 1. Scatter matrix of 5 SMART attributes of the training sample

По результатам обучения модели важно оценить ее качественные показатели. Рассмотрим 5 метрик, позволяющих оценить корректность принятых решений моделью и ее предвзятость к данным. Каждая из этих метрик предоставляет информацию о различных аспектах производительности модели, а именно:

- точность (Accuracy) – доля правильно предсказанных классов относительно всех примеров;
- точность (Precision) – доля истинно положительных примеров среди всех положительных предсказаний;
- полнота (Recall) – доля истинно положительных примеров, которые были предсказаны правильно;
- F1-мера (F1-Score) – гармоническое среднее точности и полноты;
- коэффициент корреляции Мэтьюса (Matthews correlation coefficient) – мера качества бинарной классификации, учитывающая ложные положительные и ложные отрицательные прогнозы.

Также отобразим матрицу ошибок (confusion matrix) для оценки производительности модели классификации (рис. 2).

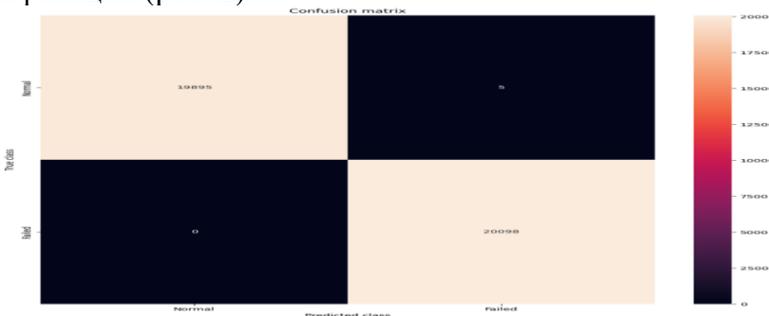


Рис. 2. Матрица ошибок модели
Fig. 2. Model error matrix

Полученные результаты метрик в ходе исследования вышли следующими:

```
[ Model ] >>> Random Forest classifier
[ The accuracy ] >>> 0.9998749937496875
[ The precision ] >>> 0.9997512809033477
[ The recall ] >>> 1.0
[ The F1-Score ] >>> 0.9998756249844531
[ The Matthews correlation coefficient ] >>> 0.9997500123101655
```

Обсуждение результатов. Далее произведем формализацию полученных результатов и сделаем вывод о проделанной работе. По полученным результатам можно сделать следующие выводы о производительности обученной модели Random Forest:

1. Точность. С высокой точностью около 99.99% модель правильно классифицирует примеры из тестового набора данных. Это означает, что модель правильно предсказывает класс примера в почти всех случаях.
2. Точность. Precision также очень высока и составляет около 99.98%. Это указывает на то, что из всех примеров, которые модель предсказала как положительные, почти все действительно являются положительными.
3. Полнота. Recall равен 1.0, что означает, что модель правильно классифицирует все истинно положительные примеры из тестового набора данных. Это хороший показатель и говорит о том, что модель эффективно обнаруживает все положительные случаи.
4. F1-мера. F1-мера, которая является гармоническим средним между точностью и полнотой, также очень высока и составляет около 99.99%. Это указывает на сбалансированность между точностью и полнотой модели.
5. Коэффициент корреляции Мэтьюса. MCC также близок к единице, что указывает на очень сильную корреляцию между предсказаниями модели и фактическими значениями классов.

В целом, эти результаты свидетельствуют о том, что модель Random Forest хорошо обучена и демонстрирует высокую производительность на тестовом наборе данных. Рассматривая матрицу ошибок, где строки представляют фактические классы, а столбцы - предсказанные классы. Приведем интерпретацию результатов:

1. True Positives (TP), верхняя левая клетка (19895) соответствует ситуации, когда модель правильно классифицировала нормальные (негативные) примеры как нормальные.
2. False Positives (FP), верхняя правая клетка (5) соответствует ситуации, когда модель неправильно классифицировала нормальные примеры как отказавшие (ложно положительные).
3. False Negatives (FN), нижняя левая клетка (0) соответствует ситуации, когда модель неправильно классифицировала отказавшие примеры как нормальные (ложно отрицательные).
4. True Negatives (TN), нижняя правая клетка (20098) соответствует ситуации, когда модель правильно классифицировала отказавшие примеры как отказавшие.

Исходя из матрицы на рис. 2, общее количество правильно классифицированных примеров (истинно нормальных и истинно отказавших) составляет 39893, а количество ошибочно классифицированных примеров (ложно нормальных и ложно отказавших) составляет 5. Также, интерес представляет визуализации элементов ансамблей деревьев. Продемонстрирую полученные 1, 2, 3 и... 50-ые построенные деревья решений на рис. 3 – 6. Метод случайного леса обладает сложной формализацией, что является его главным минусом. Но оценивая рис.3-6 в общем, можно заметить, что деревья претерпевают изменения и стараются выявить наиболее коррелирующие атрибуты для прогнозирования.

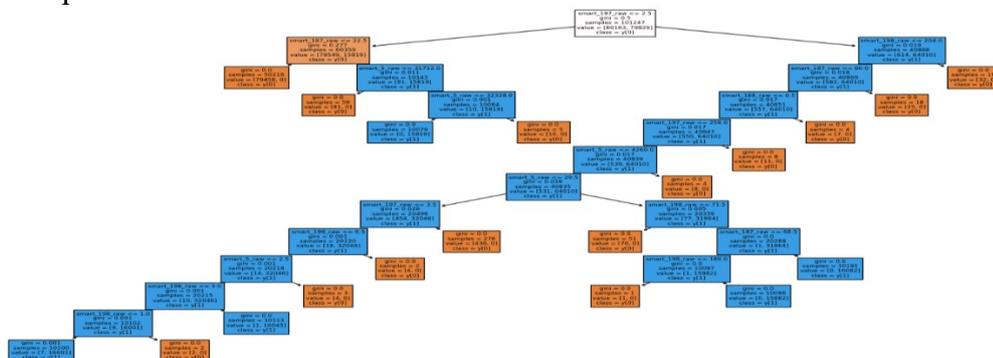


Рис. 3. Первое решающее дерево
Fig. 3. The first decision tree

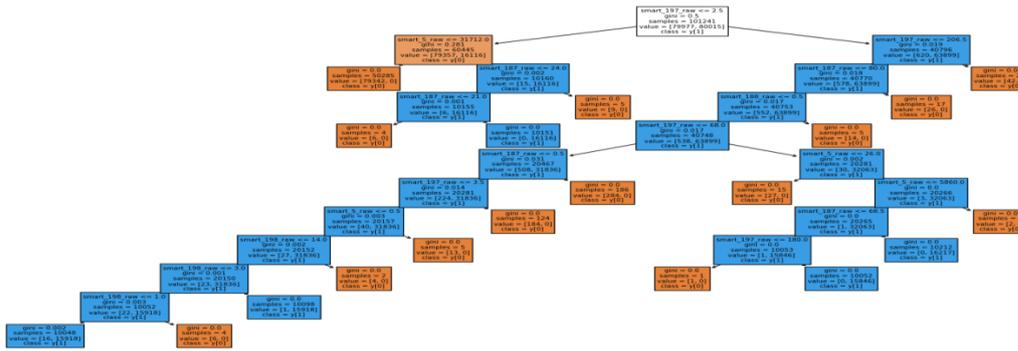


Рис. 4. Второе решающее дерево
Fig. 4. The second decision tree

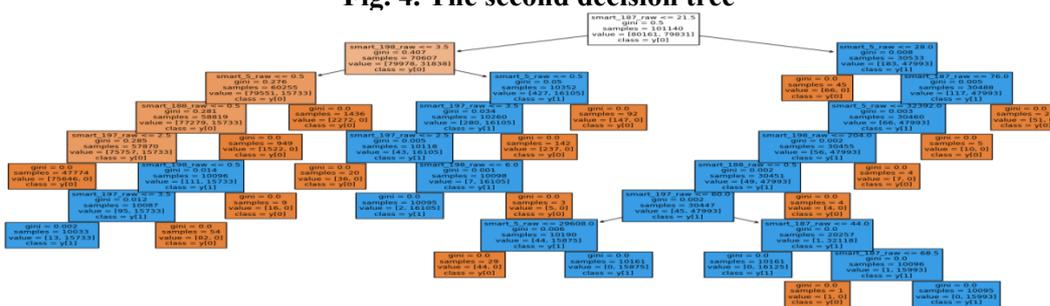


Рис. 5. Третье решающее дерево
Fig. 5. The third decision tree

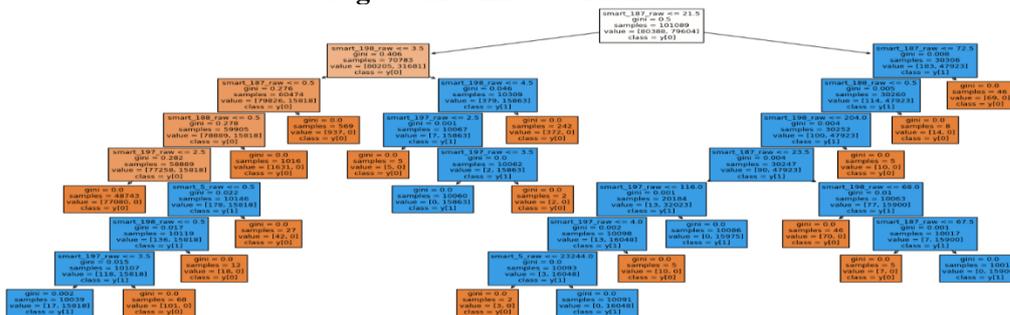


Рис. 6. Пятидесятое решающее дерево
Рис. 6. Пятидесятое решающее дерево

А в рамках данной задачи точное объяснение выдвинутого моделью решения не является ключевым аспектом, куда важнее заблаговременно узнать об ошибках и постараться выявить проблему диска, с чем модель отлично справляется.

Вывод. Таким образом, в данной работе был разработан инструмент оценки состояния компьютерного оборудования на основе алгоритма Случайного леса, используя исторические данные SMART-тестов.

Результаты работы показали, что разработанная модель обладает высокой точностью и способностью правильно классифицировать как нормальные, так и отказавшие компоненты. Анализ confusion matrix подтвердил, что модель демонстрирует хорошую способность к правильному выявлению обоих классов. Модель имеет высокую способность правильно идентифицировать нормальные состояния (True Negatives), что является хорошим показателем. Также у модели есть некоторое количество ложно положительных результатов (False Positives), что может привести к излишней тревоге или ненужным проверкам оборудования. Модель всегда удается точно предсказать отказы (False Negatives), что исключает пропуск реальных проблем. Важно, отметить, что обучение происходило в условиях сильной ограниченности вычислительной мощности. Набор данных был взят лишь за два дня наблюдений SMART-тестов 2023 года, поскольку количество оперативной памяти не позволяло оперировать большим набором, а входе эксперимента был взят максимум из предоставляемых виртуальных ресурсов вычислительной машины (рис. 7).

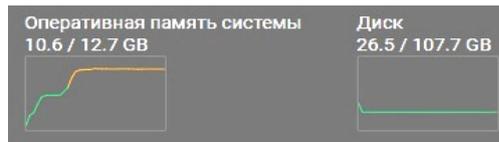


Рис. 7. Используемые вычислительные ресурсы в ходе обучения
Fig. 7. Computing resources used during training

В целом, результаты работы указывают на перспективность использования алгоритма Случайного леса для создания системы мониторинга состояния компьютерного оборудования. Дальнейшие исследования и улучшения модели могут помочь еще более точно и надежно определять отказавшие компоненты и повысить эффективность обслуживания оборудования, предоставляя результаты не хуже аналоговых систем, но используя отечественную собственную разработку, которую можно интегрировать и использовать под нужды каждого отдельного предприятия.

Библиографический список:

1. Национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р ИСО 13381-1-2011 Контроль состояния и диагностика машин. Прогнозирование технического состояния. Часть 1. Общее руководство. Дата введения 2012-12-01. Подготовлен Автономной некоммерческой организацией «Научно-исследовательский центр контроля и диагностики технических систем» (АНО «НИЦ КД»). Внесен Техническим комитетом по стандартизации ТК 183 «Вибрация, удары и контроль технического состояния». Утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 16 ноября 2011 г. № 553-ст.
2. Шкляр, В.Н. Надежность систем управления: учебное пособие – Томск: Томский политехнический университет, 2009. – 126 с.
3. Вострцова, Е.В. Основы информационной безопасности: учебное пособие – Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2019. – 208.
4. Chandola, V., Banerjee, A., & Kumar, V. (2009). Anomaly detection: A survey. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 41(3), 15.
5. Официальный сайт Smartmontools – URL <http://www.smartmontools.org/> (дата обращения: 20.09.2023) – Текст электронный.
6. Официальный сайт компании Backblaze. Статья «Backblaze Vaults: Zettabyte-Scale Cloud Storage Architecture». – URL <https://www.backblaze.com/blog/vault-cloud-storage-architecture/> (дата обращения: 20.09.2023) – Текст электронный.
7. Официальный сайт компании Backblaze. Статья «Hard Drive SMART Stats». – URL <https://www.backblaze.com/blog/hard-drive-smart-stats/> (дата обращения: 22.09.2023) – Текст электронный.
8. Официальный сайт компании Backblaze. Статья «Hard Drive Data and Stats». Набор данных для обучения – URL <https://www.backblaze.com/cloud-storage/resources/hard-drive-test-data/#downloading-the-raw-hard-drive-test-data> (дата обращения: 19.09.2023) – Текст электронный.
9. Официальный сайт компании Backblaze. Статья «What SMART Stats Tell Us About Hard Drives». – URL <https://www.backblaze.com/blog/what-smart-stats-indicate-hard-drive-failures/> (дата обращения: 21.09.2023) – Текст электронный.
10. Официальный сайт компании Backblaze. Статья «Hard Drive Data and Stats». – URL <https://www.backblaze.com/cloud-storage/resources/hard-drive-test-data/> (дата обращения: 19.09.2023) – Текст электронный.
11. Российская Федерация. Законы. О персональных данных: Федеральный закон Российской Федерации № 152-ФЗ. [принят Государственной думой 8 июля 2006 года: одобрен Советом Федерации 14 июля 2006 года]. – Москва: Кремль: Кодекс, 2021. – 24 с. // КонсультантПлюс.
12. Российская Федерация. Законы. Об информации, информационных технологиях и о защите информации: Федеральный закон Российской Федерации № 149-ФЗ: текст с изменениями и дополнениями на 20 марта 2021 года: [принят Государственной думой 8 июля 2006 года: одобрен Советом Федерации 14 июля 2006 года]. – Москва: Кремль: Кодекс, 2021. – 24 с. // КонсультантПлюс.
13. Breiman, L. *Random forests*. Machine Learning. Нью-Йорк: Springer, 2001, 32 с. (дата обращения: 18.03.2024) – Текст электронный.
14. Liaw, A., Wiener, M. *Classification and regression by random forest*. Лондон: R Foundation, 2002, 22 с. (дата обращения: 18.03.2024) – Текст электронный.
15. Cutler, D. R., Edwards Jr, T. C., Beard, K. H., Cutler, A., Hess, K. T., Gibson, J., Lawler, J. J. *Random forests for classification in ecology*. Нью-Йорк: Springer, 2007, 582 с. (дата обращения: 18.03.2024) – Текст электронный.

16. Короченцев Д.А. и др. Импортзамещающие технологии обеспечения информационной безопасности и защиты данных. – 2021.

References:

1. National Standard of the Russian Federation GOST R ISO 13381-1-2011 Condition monitoring and diagnostics of machines. Prediction of technical condition. Part 1. General guidance. Date of introduction 2012-12-01. Prepared by Autonomous Non-Commercial Organization "Research Center for Control and Diagnostics of Technical Systems" (ANO SIC CD). Introduced by the Technical Committee for Standardization TC 183 "Vibration, Shocks and Technical Condition Control". Approved and put into effect by the Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated November 16, 2011; 553 (In Russ).
2. Shklyar V.N. Reliability of control systems: textbook . Tomsk Polytechnic University, 2009;126 (In Russ).
3. Vostretsova, E.V. Fundamentals of information security: textbook - Yekaterinburg: Ural University Press, 2019; 208. (In Russ).
4. Chandola, V., Banerjee, A., & Kumar, V. Anomaly detection: A survey. ACM Computing Surveys (CSUR), 2009;41(3):15.
5. Smartmontools official website . URL <http://www.smartmontools.org/>(access. 20.09.2023) Text electronic.
6. Backblaze official website. Article "Backblaze Vaults: Zettabyte-Scale Cloud Storage Architecture." URL <https://www.backblaze.com/blog/vault-cloud-storage-architecture> (date of reference: 20.09.2023)Text electronic.
7. Official website of Backblaze. Article "Hard Drive SMART Stats." - URL <https://www.backblaze.com/blog/hard-drive-smart-stats/> (date of reference: 22.09.2023) - Text electronic.
8. Official website of Backblaze. Article "Hard Drive Data and Stats. Training dataset - URL <https://www.backblaze.com/cloud-storage/resources/hard-drive-test-data#downloading-the-raw-hard-drive-test-data> (access date: 19.09.2023) - Text electronic.
9. Backblaze official website. Article "What SMART Stats Tell Us About Hard Drives." - URL <https://www.backblaze.com/blog/what-smart-stats-indicate-hard-drive-failures/> (accessed 21.09.2023) - Text electronic.
10. Backblaze official website. Article "Hard Drive Data and Stats." - URL <https://www.backblaze.com/cloud-storage/resources/hard-drive-test-data/> (accessed 19.09.2023) - Text electronic.
11. Russian Federation. Laws. On personal data: Federal Law of the Russian Federation No. 152-FZ. [adopted by the State Duma on July 8, 2006: approved by the Federation Council on July 14, 2006]. - Moscow: Kremlin: Codex, 2021; 24. ConsultantPlus. (In Russ).
12. Russian Federation. Laws. About information, information technologies and about protection of information: the Federal law of the Russian Federation No. 149-FZ: the text with amendments and additions for March 20, 2021: [adopted by the State Duma on July 8, 2006: approved by the Federation Council on July 14, 2006]. - Moscow: Kremlin: Codex, 2021; 24 ConsultantPlus. (In Russ).
13. Breiman, L. Random forests. Machine Learning. New York: Springer, 200;32. (date of reference: 18.03.2024) - Text electronic.
14. Liaw, A., Wiener, M. Classification and regression by random forests. London: R Foundation, 2002; 22. (date of reference: 18.03.2024) - Text electronic.
15. Cutler D.R., Edwards Jr, T.C., Beard K.H., Cutler A., Hess, K. T., Gibson, J., Lawler, J. J. Random forests for classification in ecology. New York: Springer, 2007;582(date of reference: 18.03.2024) Text electronic.
16. Korochentsev D. A. et al. Import-substituting technologies for information security and data protection. - 2021. (In Russ).

Сведения об авторах:

Кодацкий Никита Максимович, студент; nickitadatsky@gamil.com; ORCID: 0009-0001-3726-0178

Ревякина Елена Александровна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Кибербезопасность информационных систем», revyelena@yandex.ru

Газизов Андрей Равильевич, кандидат педагогических наук, заведующий кафедрой «Вычислительные системы и информационная безопасность»; gazandre@yandex.ru

Information about authors:

Nikita M. Kodatsky, Student; nickitadatsky@gamil.com; ORCID: 0009-0001-3726-0178

Elena A. Revyakina, Cand. Sci. (Eng.), Assoc.Prof., Department "Cyber Security of Information Systems"; revyelena@yandex.ru

Andrey R. Gazizov, Cand. Sci. (Pedag.), Head of the Department "Computing Systems and Information Security"; gazandre@yandex.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/ Received 27.05.2024.

Одобрена после рецензирования/ Revised 20.06.2024.

Принята в печать/ Accepted for publication 15.10.2024.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 004.094



DOI: 10.21822/2073-6185-2024-51-4-99-111

Оригинальная статья / Original article

Показатели безопасности для современных систем электронного документооборота

И.И. Лившиц

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

Резюме. Цель. В современных системах электронного документооборота (СЭД) обеспечивается управляемое движение множества документов по различным маршрутам. Успешное функционирование СЭД в значительной мере определяется доступностью конкретного документа в нужное время для определенного пользователя. Целью исследования является разработка математической модели СЭД, позволяющей определять показатель доступности ЭД с учетом УБИ и выполнять оптимизацию с учетом сложной организационной структуры современных организаций. **Метод.** Исследование проведено с помощью аппарата марковских процессов и формирования численных показателей безопасности. Особое внимание уделяется расчетам численного показателя доступности, позволяющего не только определять эффективность комплекса действующих мер защиты, но и количественно обосновывать требования ко времени обработки электронных документов. **Результат.** Определен важный атрибут – доступность, численный показатель которого позволяет оценивать общий уровень конкретной СЭД и одновременно решать множество частных задач выявления и противодействия угрозам блокирования информации, злонамеренной задержки согласования, отклонения от установленных маршрутов, что напрямую влияет на доступность и, соответственно, на общий уровень безопасности. **Вывод.** Известные типы применяемых моделей (функциональный, теоретико-множественный, теоретико-графовый, вероятностно-параметрический) не позволяют явно формировать оценки доступности. Предложенная модель позволяет идентифицировать уязвимости в СЭД, которые могут быть использованы для реализации новых УБИ и содействовать повышению уровня обеспечения ИБ в проектах СЭД.

Ключевые слова: электронный документ, система электронного документооборота, метрики безопасности, риски, остаточные риски, информационная безопасность, доступность, оптимизация

Для цитирования: И.И. Лившиц. Показатели безопасности для современных систем электронного документооборота. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2024;51(4):99-111. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-4-99-111

Security indicators for modern electronic document management systems

I.I. Livshits

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

Abstract. Objective. Modern electronic document management systems (EDMS) provide controlled movement of multiple documents along different routes. Successful functioning of EDMS is determined by the availability of a specific document at the right time for a specific user. The purpose of the study is to develop a mathematical model of EDMS that allows determining the indicator of ED availability taking into account the UBI and performing optimization taking into account the complex organizational structure. **Method.** The study was conducted using the apparatus of Markov processes and the formation of numerical safety indicators.

Particular attention is paid to the calculations of the numerical indicator of availability. **Result.** An important attribute has been determined - availability, the numerical indicator of which allows assessing the general level of a specific EDMS and simultaneously solving many specific problems of identifying and countering threats of information blocking, malicious delay in approval, deviation from established routes, which affects availability and, accordingly, the overall level of security. **Conclusion.** Known types of applied models (functional, set-theoretic, graph-theoretic, probabilistic-parametric) do not allow explicitly forming availability assessments. The proposed model allows identifying vulnerabilities in the EDMS, which can be used to implement new UBI and contribute to increasing the level of information security in EDMS projects.

Keywords: electronic document, electronic document management system, security metrics, risks, residual risks, information security, availability, optimization

For citation: I.I. Livshits. Security indicators for modern electronic document management systems. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2024; 51(4):99-111. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-4-99-111

Введение. В настоящее время многие компании реализуют масштабные программы по внедрению СЭД [1,2]. Известно, что при эксплуатации СЭД объективно требует не только обработка значительного количества электронных документов (ЭД), но и обеспечение заданного уровня ИБ. Требования ИБ обусловлены тем фактом, что из-за объективных недостатков реализации управляемых информационных потоков (УИП) возможна реализация рисков доступности, соответственно, часть ЭД может не быть обработана в заданное (целевое) время [3]. Следует признать, что внимание к реализации требований ИБ является в настоящее время объективно важной и актуальной проблемой, поскольку постоянно обнаруживаются новые и новые угрозы безопасности информации (далее – УБИ), в самых различных реализациях СЭД.

Постановка задачи. Для целей обеспечения ИБ в современных СЭД крайне важно обратить внимание на качество разработки и реализации маршрутов движения ЭД и оптимизации системной логики обработки, т.е. от «качества» практической реализации СЭД объективно зависит эффективность управленческой деятельности компании в целом. Для конкретной компании, «включившей» в состав корпоративного ИТ-ландшафта СЭД, задача анализа особенностей движения ЭД в аспекте ИБ приобретает исключительную важность: ущерб при нарушении бесперебойного движения ЭД может быть значительным, вплоть до полного блокирования нормального функционирования (известны примеры критических сбоев СЭД Росавиации и ФТС [13, 14]). В типовой СЭД определенный ЭД недоступен пользователю, пока не поступит конкретная задача его обработки. При наличии отклонений, вызванных различными УБИ, конкретный ЭД может не достигнуть точки назначения по маршруту в заданное (расчётное) время. В связи с этим в типовой СЭД может нарушаться важное свойство ИБ – доступность (в соответствии с требованиями известных стандартов ГОСТ Р ИСО/МЭК 27001-2021 или ISO/IEC 27001:2022). Из указанного положения логично следуют требования к обеспечению всех аспектов безопасности, предъявляемые к такому объекту, как СЭД. В определенном смысле (например, в соответствии с указанными выше стандартам ГОСТ Р ИСО/МЭК), можно говорить о «результативности», как способности СЭД достигать заданных целей ее создания. Безопасная СЭД должна не только автоматизировать движение ЭД, но и обеспечивать достижение результата с точки зрения выбранного критерия (критериев) по определенным маршрутам. В этом аспекте представляется обоснованным обратить внимание на оптимизационные задачи, связанные с нахождением оптимальных путей прохождения (маршрутов) ЭД в СЭД и гарантирующих успешное достижение финальной точки. В представленной публикации предлагается для СЭД применять новый критерий безопасности – численную оценку вероятности достижения ЭД заданного маршрута [4].

Анализ литературы [5-11] показал, что вопрос эффективного управления информационными потоками ЭД изучен не в полной мере. Известно, что к настоящему моменту времени существует достаточно методов моделирования СЭД, начиная с теоретико-множественных, теоретико-графовых подходов и заканчивая моделями на сетях Петри. Следует отметить, что схожие модели используются в иных предметных областях, например, при решении транспортных и логистических задач, управления задачами в центрах обработки данных и др. В то же время, обоснованной математической модели СЭД, которая позволила бы оптимизировать движение ЭД с учетом критериев ИБ (конкретно – доступности), в опубликованных работах не представлено. Применение методов математического моделирования может быть обосновано комплексом преимуществ – получением численных значений, позволяющих оптимизировать варианты реализации мероприятий по ИБ, известной практикой программной реализации, возможностью верификации полученных результатов. Представленная статья состоит из краткого обзора применяемых моделей известных подходов (функционального, теоретико-множественного, теоретико-графового, вероятностно-параметрического), описания математической модели СЭД, формирования задачи оптимизации и примера численного расчета с использованием системы уравнений Колмогорова.

Целью настоящего исследования является разработка математической модели для оценки безопасности СЭД с учетом УБИ в отношении доступности ЭД и показателей безопасности для современных СЭД.

В работе Круковского М.Ю. [4] рассматривается подход к созданию моделей композитного документооборота на основе аппарата теории графов. Описаны методы определения множеств для разработанной модели, предложена алгебра документооборота с использованием графов. Положения этих работ могут быть использованы для дальнейшего развития теории и практики электронного документооборота и создания на их основе прикладного программного обеспечения. В работе [5] предложена модель, описывающая организационную структуру, как упорядоченное множество элементов структуры предприятия – подразделений и функциональных служб; а также процессы, протекающие в системе управления по элементам в составе деятельности по осуществлению функций управления. Достаточно интересно описана организационная культура, характеризующая уровень отношения в организации к так называемым структурообразующим документам.

В работе [6] представлена модель в нотации eEPC (*extended Event Driven Process Chain*), в которой определены множества объектов: типа I, которое состоит из элементов I_{pos} и I_{org} , где: I_{pos} – множество объектов типа «Должность»; I_{org} – множество объектов типа «Организационная единица», соответственно; типа D, которое состоит из элементов D_{doc} и D_{inf} , где: D_{doc} – множество объектов типа «Документ», D_{inf} – множество объектов типа «Информационный объект», соответственно. Представленная работа дает хороший аналитический базис в известной функциональной нотации, но без принятия во внимание аспектов обеспечения безопасности движения ЭД в СЭД.

В работе [7] рассматриваются информационные системы юридически значимого электронного документооборота в структуре управления Вооруженными силами Российской Федерации. Разработана математическая модель процесса обеспечения технической и юридической целостности ЭД и представлена модель УБИ, вызванных внутренними и внешними факторами. В указанной работе применяется логико-вероятностный метод И.А. Рябилина, позволяющий получать численные значения вероятностей перехода информационных систем в опасное состояние с учетом структуры таких систем. В работе [8] рассматриваются формальные системы математической логики, в том числе система алгебры конечных предикатов, применительно к решению задач ЭДО. Предложен вывод о необходимости описания процессов в СЭД на языке теорий математической логики, позволяющих учитывать не только содержание, но и структуру

формализованного ЭД. Сделаны выводы о том, что применение логических моделей позволяет снизить затраты на вычислительные мощности и сократить машинное время обработки ЭД, но вопросы обеспечения ИБ в СЭД не рассматриваются.

Публикация [9] по мнению автора по праву является классическим трудом в области создания математических моделей с ключевым вниманием к оценке эффективности защиты от УБИ по отношению к полной «триаде» ИБ: целостности, доступности и конфиденциальности ЭД. В указанной работе учитывается также длительность жизненного цикла (ЖЦ) в отношении ЭД для СЭД. Математическое моделирование процессов СЭД и реализации УБИ выполнено с использованием аппарата сетей Петри-Маркова. В работе [10] рассматриваются проблемы документационного сопровождения управленческого решения, а также описываются технологии и модели организации документооборота. Представлены методы и алгоритмы принятия решения при организации контроля, но конкретные детали процессов обеспечения ИБ в СЭД не рассматриваются; представлена математическая модель динамики функционирования подсистемы защиты конфиденциальных сведений в СЭД. Модель разработанная на основе графовой формализации с использованием аппарата сетей Петри и матрицы вероятностно-временных характеристик переходов между состояниями функционирования системы. Существенным отличием данной публикации является описание динамики функционирования подсистемы защиты конфиденциальных сведений. В работе Краснянского М.Н. [11] исследуются математические модели обработки информации в СЭД. Предложенные модели используются для формализации структуры ЭД, оптимизации процессов их обработки, взаимодействия и движения.

В работе представлен теоретико-множественный анализ процессов обработки информации и реализация в алгоритмическом и программном обеспечении. Вопросы обеспечения ИБ в СЭД в упомянутой работе не рассмотрены.

Методы исследования. В рамках функциональной модели предлагается следующая последовательность действий для анализа эффективности СЭД. В практическом аспекте предлагается для реализации высокоуровневая схема моделирования УИП в типовой СЭД (рис. 1).

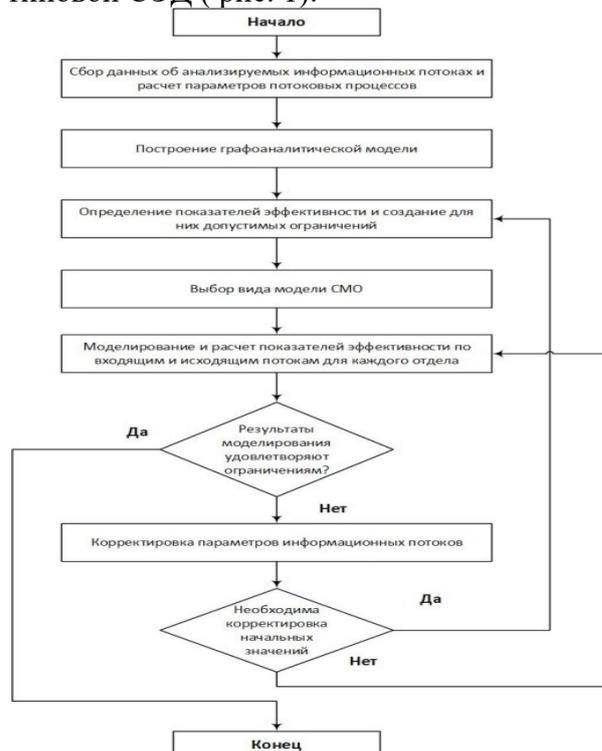


Рис. 1. Высокоуровневая схема моделирования УИП в СЭД
Fig. 1. High-level scheme of modeling UIP in the ECM

Описанная выше схема отличается универсальностью и упрощает дальнейший процесс моделирования, так как формирует единое представление о движении УИП в конкретной СЭД. Явным достоинством данной модели является учет типа ЭД – этот параметр может внести позитивный вклад при локализации «узкого» места при оптимизации маршрутов ЭД в СЭД. Необходимо отметить, что в аспекте поставленной задачи оценки безопасности СЭД (конкретно – доступности), рассмотренная выше схема в терминах теории множеств требует существенных доработок. Например, хотя в алгоритме анализа и моделирования УИП предусмотрено задание допустимых ограничений и последующее их сравнение с реальными показателями, в рассматриваемой схеме для учета отклонений не введены важные план-фактные переменные.

Кроме того, как показала практика, ограничения следует устанавливать не только на показатели эффективности, но и на маршрутные показатели следования конкретного ЭД, минимально для идентификации его «обратного» движения или заикливания. Таким образом, в текущем виде базовая теоретико-множественная модель не может быть эффективно использована при решении задачи обеспечения безопасности СЭД, так как не отражает всех требований к доступности ЭД. В то же время предложенная графоаналитическая модель может быть практически применена для целей обеспечения безопасности СЭД, поскольку позволяет дополнительно наглядно отобразить взаимодействие подразделений (конкретных исполнителей) и оценивать эффективность маршрутов движения ЭД в аспекте оценки доступности. Тем не менее, существенные ограничения должны быть приняты при проектировании новых СЭД и/или оптимизации существующих – в отношении реализации временной шкалы, что является предметом исследования представленной публикации. Крайне важно, что применение подходов, использующих экспертные процедуры оценивания уровня ИБ в СЭД, но не учитывающих временной фактор, могут приводить к неполной, и даже к некорректной оценке.

Теоретико-множественный подход. Описание в терминах теории множеств для исходящих и входящих УИП приводится в [5], где теоретико-множественная модель представляется следующим образом:

$$S_i = \langle \{L_{ij}\}, \{T_{ij}\} \rangle,$$

где: S_i – определение конкретного подразделения, УИП которого исследуются; $\{L_{ij}\}$ – множество входящих документов для выбранного i -го подразделения, поступающих из j -го подразделения; $\{T_{ij}\}$ – множество исходящих документов, направляемых из текущего i -го подразделения для j -ого подразделения.

Представленная модель на соответствующих уровнях организационной структуры конкретной организации отображает меру взаимодействия между подразделениями S_0, S_1, \dots, S_n . Для целей данной публикации отметим, что преимуществом модели [5] является возможность оценивания эффективного распределения нагрузки между различными категориями исполнителей.

Теоретико-графовый подход. Теоретико-графовый подход описан в [4]. В соответствии с этим подходом СЭД представлена как совокупность упорядоченных действий, реализуемых множеством конкретных исполнителей над множеством определенных ЭД:

$$\text{ФМД} = \{И; Д; С\},$$

где: ФМД – формальная модель документооборота; И – множество исполнителей; Д – множество действий, С – множество состояний.

Конечная совокупность дискретных представлений конкретного ЭД в пределах его ЖЦ определяется множеством состояний. Логика документооборота представляется в виде последовательности определенных действий, которые приводят конкретный ЭД (как объект управления) к смене одного из определенных состояний на другое, соответственно, описывается «следование» определённого ЭД по конкретному маршруту из начального (исходного) состояния в требуемое (конечное). Теоретико-графовую

модель можно также определить на основе применения матрицы инцидентности, которая определяет общую теоретико-графовую модель СЭД для рассматриваемого конкретного бизнес-процесса. Модели такого типа подходят для обнаружения отклонений в заданном маршруте следования ЭД [7,8]. Целесообразно отметить, что построение матрицы инцидентности и ее анализ придется выполнять для каждого ЭД в отдельности, что может потребовать избыточных вычислительных ресурсов для СЭД крупной компании.

Вероятностно-параметрический подход. Сеть Петри-Маркова может быть формально представлена в виде [9]: $\theta = \langle \Pi, M \rangle$,

где: Π – сеть Петри, определяющая структуру сети Петри-Маркова, M – случайный процесс, накладываемый на структуру Π .

Рассматриваемая модель [9] позволяет обеспечить расчет среднего времени обработки конкретных ЭД, кроме того, расчеты строятся на основе структурно-операционной модели процесса обработки конкретного ЭД (рис. 2).

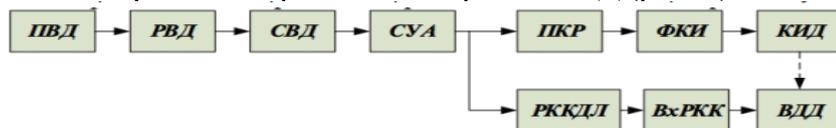


Рис. 2. Структурно-операционная модель процесса обработки ЭД
Fig. 2. Structural and operational model of the ED processing process

На рис. 2 обозначены процедуры: ПВД – приема входящего ЭД; РВД – регистрации входящих документов; СВД – сканирования входящего ЭД; СУА – создания уведомления адресата; ПКР – подготовки карточки резолюции; ФКИ – формирования карточки исполнения; КИД – контроля исполнения документа; РККДЛ – создания регистрационно-контрольной карточки исходящего документа; ВхРКК – создания регистрационно-контрольной карточки входящего документа; ВДД – вывода документа из действия.

На основании конкретных траекторий движения ЭД, а также учитывая среднюю длительность исполнения каждой функции по конкретной траектории, в рассматриваемой модели формируют оценку среднего времени исполнения конкретного ЭД, которую затем применяют в показателях оценки эффективности системы ИБ в конкретной реализации СЭД [9]. Определим ограничения: длительность ЖЦ i -го ЭД объективно является случайной величиной, которая зависит от множества факторов (например, количество процедур обработки конкретного ЭД, объем рассматриваемого ЭД, квалификация (мотивация) назначенных исполнителей и т.д.). Предложенная модель на сетях Петри-Маркова соответствует реальным УИП в СЭД и будет рассмотрена далее при формировании новой модели СЭД. Уместно заметить, что в известных источниках не рассматривается риск-ориентированный подход, позволяющий оценить возможный ущерб нарушения нормального движения ЭД в корпоративных СЭД с последующим нарушением их доступности [5].

Математическая модель СЭД с использованием аппарата марковских процессов. При рассмотрении процессов в СЭД целесообразно представлять процессы движения ЭД таким образом, что переходы объектов (ЭД) из состояния в состояние происходят под действием потоков событий. В терминах потока событий возможно описать поток ЭД, связанных с определенным бизнес-процессом, поскольку:

1. Поток ЭД, перемещающихся из состояния в состояние, возможно рассматривать как стационарный на интервалах рабочего времени, установленного в компании, благодаря тому что вероятностные характеристики такого потока на указанных промежутках времени не меняются;
2. События, образующие поток, появляются в последовательные моменты времени независимо (сотрудники запускают один и тот же бизнес-процесс независимо друг от друга, например, запуск заявок на командирование);

3. Вероятность «попадания» на заданный интервал времени двух или более событий пренебрежимо мала по сравнению с вероятностью «попадания» одного события, иными словами, поток ординарен.

Соответственно, представляется целесообразным применить теорию дискретных марковских случайных процессов с непрерывным временем [12] для моделирования бизнес-процессов, в рамках которых функционирует конкретный экземпляр СЭД.

Для описания поведения реальной СЭД необходимо: определить все конкретные состояния, в которых может находиться рассматриваемая система; сформировать граф состояний, т.е. указать пути возможных переходов (маршрутов) системы из одного состояния в другое; определить начальное состояние рассматриваемой системы; сформировать матрицу интенсивностей переходов, иными словами, для каждого возможного перехода указать соответствующую интенсивность потока событий, переводящих систему из одного состояния в другое. Моменты возможных переходов в моделируемых бизнес-процессах СЭД из состояния в состояние случайны и происходят под действием событий, характеризующихся интенсивностям. Поскольку рассматривается движение значительного количества ЭД (несколько тысяч в месяц), для описания функционирования конкретной СЭД может быть применен эффективный метод динамики средних. Демонстрация модели на нескольких примерах представленной размерности (сотни маршрутов движения ЭД и тысячи ЭД в месяц) может считаться достаточным экспериментальным доказательством практической эффективности предложенного метода для оценки безопасности конкретной реализации СЭД. Соответственно, уравнения Колмогорова составляются относительно средних численностей (математических ожиданий) состояний исследуемых объектов.

Формализация задачи оптимизации функционирования СЭД. Принимая к исследованию функциональную модель СЭД [7], представим процессы обработки ЭД в виде графа состояний (рис. 3):

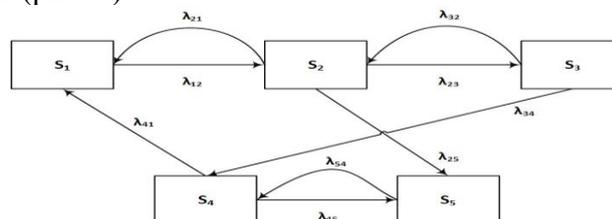


Рис. 3. Граф состояний функционирования СЭД
Fig. 3. Graph of the functioning states of the ECM

ЭД может находиться в одном из 5 состояний: S_1 – подготовка ЭД; S_2 – согласование ЭД; S_3 – утверждение ЭД; S_4 – исполнение и контроль исполнения ЭД; S_5 – сдача ЭД в архив.

Задача оптимизации функционирования системы СЭД может быть сформулирована следующим образом:

$$F = C_3 m_3 + C_4 m_4 \rightarrow \max$$

Для стационарного режима вводятся следующие ограничения целевой функции:

$$m_1 + m_2 + m_3 + m_4 + m_5 = N$$

$$m_1(0) = N, m_1 \leq 100, m_2 \leq 90$$

где: C_3 (C_4) – стоимость нахождения системы в единицу времени в состоянии S_3 (S_4); m_j ($j=1...5$) – средняя численность элементов системы в j -ом состоянии; λ_{ij} ($i=1...5$) – интенсивность перехода элемента системы из i -го в j -ое состояние.

Критерий оптимальности затрагивает только состояния S_3 (S_4), таким образом, многокритериальная задача оптимизации функционирования СЭД может быть представлена как однокритериальная задача путем свертки критериев $C_i m_i$ по каждому оптимизируемому состоянию (S_i) в один. Выражение $m_1 + m_2 + m_3 + m_4 + m_5 = N$ и $m_1(0) = N$ являются нормирующими и определяют начальные условия решения

системы линейных алгебраических уравнений, а также общее количество ЭД в исследуемой СЭД. Соотношения $m_1 \leq 100$ и $m_2 \leq 90$ ограничивают максимальное количество ЭД в состояниях S_1 (S_2), и призваны сократить количество ЭД в «непродуктивных» состояниях. Оптимизацию предлагается производить как по средним численностям состояний ЭД – m_j ($j=1..5$), так и по интенсивностям переходов λ_{ij} . Выбор среди интенсивностей параметров управления зависит от рассматриваемой ситуации для «целевой» СЭД.

Построенная модель позволяет перейти к важной и актуальной задаче – формированию численной оценки рисков ИБ в СЭД (например, в соответствии с требованиями ГОСТ Р ИСО 31000–2019 или ISO 31000:2018). В рамках исследуемой задачи под оценкой риска понимается количественная оценка негативных последствий отклонения от запланированных переходов по фиксированному маршруту и негативное влияние на доступность ЭД. В рассматриваемом примере оценка объективно носит многокритериальный характер и, соответственно, определяется не в стоимостном выражении, а в условных единицах по 100-балльной шкале экспертным методом.

Уместно отметить несколько важных моментов, которые могут расширить применение данной работы:

- стандарты ГОСТ Р ИСО (ISO) серии 31000 предусматривают более 40 методов оценивания рисков, в том числе и быстрый эффективный метод экспертной оценки;
- результаты экспертных оценок данной работы подтверждаются независимыми внешними аудитами (обязательными для определенного типа компаний).

Анализ полученных результатов объективно поможет лицам, принимающим решения (ЛПР), сформировать конкретные и четкие рекомендации, основанные на оперативных, достоверных данных и успешно идентифицировать «узкие» места в функционировании конкретной СЭД для ее непрерывного совершенствования в аспекте ИБ. Поскольку интенсивность перехода из состояния в состояние обратна пропорциональна среднему времени перехода, для реализации оптимального решения ЛПР следует выяснить, какие факторы существенно влияют на время согласования конкретных категорий документов. Среди них могут быть, в частности: сложность процесса согласования, связанная с отсутствием типовых маршрутов, количество ЭД, низкая дисциплина сотрудников, недостаточная квалификация и мотивация персонала.

Уместно обратить внимание, что задача оптимизации функционирования СЭД напрямую связана с обеспечением доступности ЭД, что позволяет предоставить обоснованные численные оценки степени обеспечения ИБ. В частности, задачи оптимизации затрагивают все подразделения, «охваченные» СЭД, и позволяют определить обобщенный показатель доступности ЭД через понятие «петли» (как негативного влияния на расчетную доступность СЭД. Кроме того, учет множества факторов, влияющих на доступность ЭД позволит объективно вычислить общий показатель безопасности СЭД в конкретной реализации (в том числе с учетом реализованных мер ИБ). Для задачи оптимизации СЭД важно, что в каждой точке маршрута ЭД может находиться в одном из трех состояний – «Согласовано», «Согласовано с замечаниями», «Не согласовано». Входными данными для такой модели движения ЭД является точное понимание возможных переходов, которые необходимо смоделировать, а также вероятности перехода из одного состояния в другое, которые представляются в виде матрицы переходов и могут быть исчислены на основании статистического анализа движения конкретного типа ЭД в конкретной реализации СЭД, как показано выше.

Процесс согласования одного конкретного вида ЭД может быть представлен следующей моделью (рис. 4): Каждой цифре соответствуют следующие этапы согласования: 1 – согласование непосредственным руководителем; 2 – согласование в отделе №1; 3 – согласование в отделе №2; 4 – согласование в отделе №3;

5 – согласование в отделе № 4; 6 – согласование главным бухгалтером; 7 – согласование генеральным директором; 8 – получение результата «Согласовано»; 9 – получение результата «Не согласовано»; 10 – 13 – дополнительные согласования сотрудниками, ранее не предусмотренными в заданном маршруте («петли», лишняя «паразитная» работа).

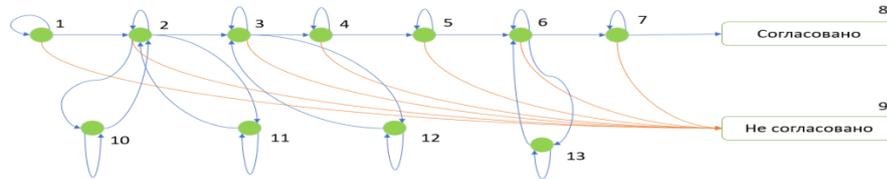


Рис. 4. Модель согласования конкретного вида ЭД
Fig. 4. Model of coordination of a specific type of ED

Обсуждение результатов. Экспериментальная оценка функциональной модели СЭД, представленной на рис. 3, определяет, что в каждую точку установленного маршрута конкретный ЭД приходит с одним из статусов – «Согласовано», «Согласовано с замечаниями», «Не согласовано» (например, $\lambda_{23}, \lambda_{25}, \lambda_{24}$ – интенсивности согласования документа Отделом №1, λ_{21} – интенсивность несогласования документа Отделом №1), как было показано ранее на рис. 4. Входными данными для представленной модели движения ЭД является точное понимание возможных переходов, которые необходимо смоделировать, а также интенсивности переходов из одного состояния в другое, которые могут быть исчислены на основании статистического анализа движения определенного типа ЭД в конкретной корпоративной реализации СЭД.

Такой вид модели имеет существенные преимущества:

1. Учитывает статистическую неопределенность времени обработки конкретного ЭД в определенном отделе: интенсивности переходов обратно пропорциональны среднему времени работы над конкретным видом ЭД;
2. Учитывает непредсказуемый порядок осуществления переходов между возможными состояниями: в частности, учитывается, что в любой момент времени конкретный ЭД может находиться на обработке в любом из отделов.

Анализ конкретного вида ЭД подразумевает под собой их большое количество, соответственно, необходимо возвратиться к методу динамики средних. Система дифференциальных уравнений Колмогорова, соответствующая графу состояний, представленному на рис. 3, относительно средних численностей состояний ЭД примет следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{dm_1}{dt} = -m_1(\lambda_{12} + \lambda_{13} + \lambda_{14}) + m_2\lambda_{21} + m_3\lambda_{31} + m_4\lambda_{41} + m_5\lambda_{51} \\ \frac{dm_2}{dt} = -m_2(\lambda_{21} + \lambda_{23} + \lambda_{24} + \lambda_{25}) + m_1\lambda_{12} + m_3\lambda_{32} + m_4\lambda_{42} + m_5\lambda_{52} \\ \frac{dm_3}{dt} = -m_3(\lambda_{31} + \lambda_{32} + \lambda_{34} + \lambda_{35}) + m_1\lambda_{13} + m_2\lambda_{23} + m_4\lambda_{43} + m_5\lambda_{53} \\ \frac{dm_4}{dt} = -m_4(\lambda_{41} + \lambda_{42} + \lambda_{43} + \lambda_{45}) + m_1\lambda_{14} + m_2\lambda_{24} + m_3\lambda_{34} + m_5\lambda_{54} \\ \frac{dm_5}{dt} = -m_5(\lambda_{51} + \lambda_{52} + \lambda_{53} + \lambda_{54}) + m_2\lambda_{25} + m_3\lambda_{35} + m_4\lambda_{45} \end{cases}$$

Нормирующее условие: $m_1 + m_2 + m_3 + m_4 + m_5 = N$, где: N – количество документов конкретного вида. Матрица интенсивностей переходов представлена в табл. 1.

Таблица 1. Матрица интенсивностей переходов (количество/час)

Table 1. Transition intensity matrix (number/hour)

	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅
S ₁	0	0,2	0	0	0
S ₂	0	0	0,15	0	0
S ₃	0,15	0,7	0	0,7	0
S ₄	0,15	0	0,3	0	0,4
S ₅	0,3	0	0	0,2	0

При заданной матрице интенсивностей переходов и $N = 250$ (кол-во ЭД) получим решение системы дифференциальных уравнений при помощи Python (рис. 5).

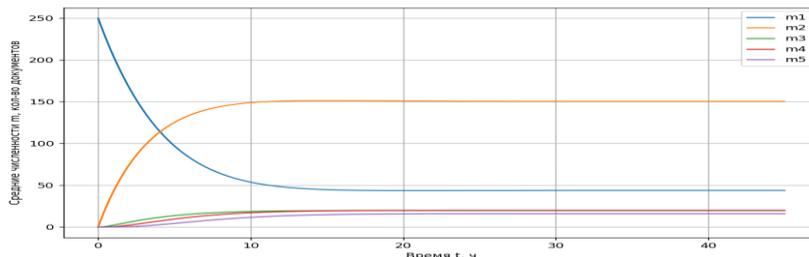


Рис. 5. Решение системы дифференциальных уравнений в Python
Fig. 5. Solving a system of differential equations in Python

В стационарном режиме система имеет вид:

$$\begin{cases} 0 = -m_1\lambda_{12} + m_3\lambda_{31} + m_4\lambda_{41} + m_5\lambda_{51} \\ 0 = -m_2\lambda_{23} + m_1\lambda_{12} + m_3\lambda_{32} \\ 0 = -m_3\lambda_{34} - m_3\lambda_{32} + m_2\lambda_{23} + m_4\lambda_{43} - m_3\lambda_{31} \\ 0 = -m_4\lambda_{41} - m_4\lambda_{45} + m_3\lambda_{34} - m_4\lambda_{43} + m_5\lambda_{54} \\ 0 = -m_5\lambda_{54} + m_4\lambda_{45} - m_5\lambda_{51} \end{cases}$$

Решение системы линейных алгебраических уравнений:

$$m_1 = 49; m_2 = 150; m_3 = 18; m_4 = 18; m_5 = 15$$

При имеющейся матрице интенсивностей переходов большое количество документов находится в Отделе №1 (рис. 3), значительная доля документов возвращается на доработку. Анализ системы в стационарном режиме позволяет объективно определить, где находятся «узкие места» в маршрутах согласования ЭД в корпоративной СЭД. Построенная модель позволяет перейти к численной оценке рисков ИБ в СЭД, что соответствует известному подходу ГОСТ Р ИСО серии 31000 и 27005.

В рамках решения задачи оперативного планирования СЭД, определено, для анализа процессов со стороны ЛПР, необходимы отчеты с объективными данными об исполнительской деятельности сотрудников за определенный период с полями, минимально: «Исполнитель», «Подразделение исполнителя», «Дата начала», «Результат задачи», «Плановая дата исполнения», «Фактическая дата исполнения», «Плановый срок», «Фактический срок», «Просрочка», «Факт-план», «Количество итераций».

В рамках рассматриваемой задачи оценка «Количество итераций» рассматривается как число дополнительных излишних («паразитных») циклов согласования ЭД. В аспекте ИБ излишние циклы согласования ЭД могут реализовываться как по заданным маршрутам, так и неуправляемо (в критичном случае – реализации УБИ) порождать новые маршруты движения ЭД, но в любом случае существенно влияют на доступность. Если количество итераций не равно нулю, следовательно, имело место быть обратное движение ЭД, а именно – «паразитная» работа (как было показано на рис. 4). Соответственно, для отслеживания временных отклонений в согласовании ЭД предлагается ввести дополнительные показатели «Отклонение» и «Наличие просрочки». В поле «Отклонение» подсчитывается разность между фактической датой исполнения ЭД и его плановой датой, в связи с чем значения в пределах данного поля могут быть как положительными (позднее исполнение), так и отрицательными (раннее исполнение).

Разработаем систему показателей для определения степени обеспечения ИБ и СЭД и, конкретно, заданной степени доступности. Для отражения факта достижения (недостижения) поставленных целей, выраженных количественно, введем метрики безопасности. Для этой цели предлагается руководствоваться стандартом ГОСТ Р ИСО/МЭК (ISO/IEC) серии 27004, где представлены рекомендации по разработке и использованию измерений в области ИБ, в том числе с учетом возможности оперативного анализа полученных результатов со стороны ЛПР. Примем во внимание набор анализируемых показателей степени обеспечения ИБ (метрик ИБ), в частности: процент несогласования, процент просрочек, наличие «паразитной работы»

(или «петель», как было показано на рис. 4), длительное согласование и занятость (непосредственно влияющих на доступность):

- процент несогласования – доля не согласованных исполнителем документов к общему числу рассмотренных;
- процент просрочек – доля документов с нарушенным сроком исполнения к общему числу документов, обработанных исполнителем;
- процент согласования – доля согласованных и согласованных с замечаниями исполнителем документов к общему числу рассмотренных;
- наличие «петель» – доля документов с любыми отклонениями от планируемых переходов по маршруту к общему числу документов исполнителя;
- занятость – общее количество документов, обработанных исполнителем за определенный временной промежуток.

Предложенные показатели СЭД могут быть наглядно представлены в виде системы отчетов. Например, полный анализ текущего состояния функционирования системы СЭД логически разделяется на три части – сравнение сотрудников выбранных подразделений по двум показателям с возможностью масштабирования (рис.6), сводка результатов согласования документов по выбранным подразделениям (рис.7) и ранжирование подразделений по одному предопределенному показателю (рис.8), соответственно. Дополнительные показатели ИБ позволяют ЛПП оперативно обнаружить тех сотрудников, которые являются лидерами в генерации «петель», например, в составе одного подразделения (рис. 6). Такой анализ, предпринятый своевременно, позволит существенно снизить риски доступности корпоративной СЭД, например, для выполнения крупного заказа или оценить уровень обеспечения ИБ до начала внешнего аудита по требованиям безопасности.

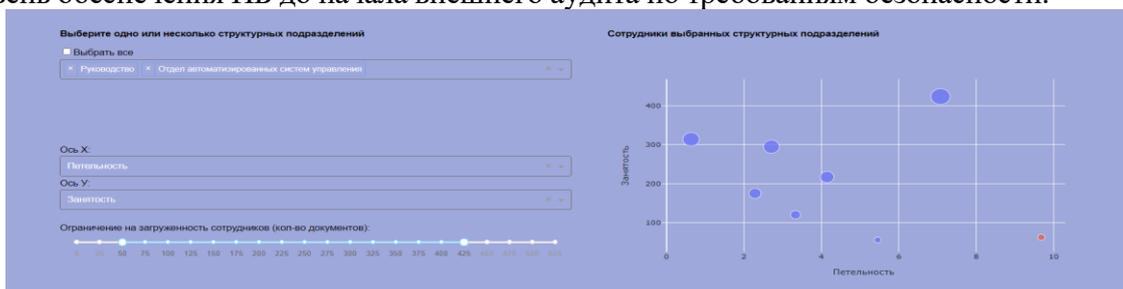


Рис. 6. Сравнение сотрудников подразделений по двум дополнительным показателям
Fig. 6. Comparison of department employees by two additional indicators

Аналогичные результаты на более высоком уровне иерархии могут быть сформированы в разрезе подразделений и определенных статусов ЭД, «проходящих» через них по установленным маршрутам (рис. 7).

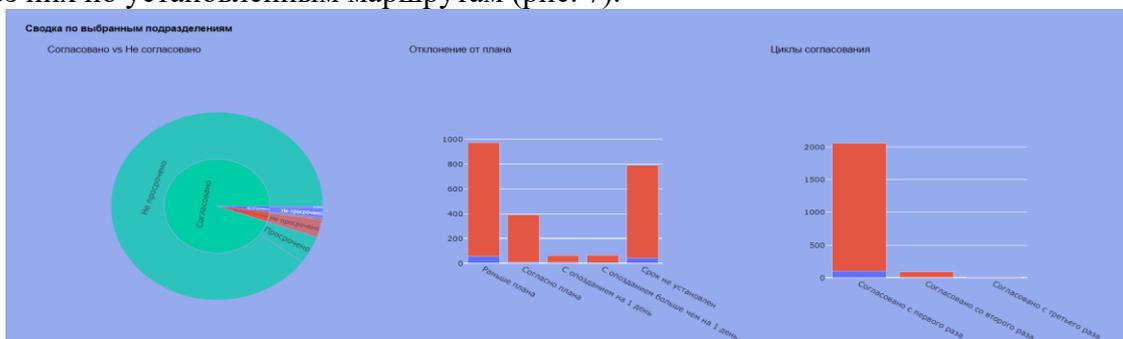


Рис. 7. Сводка по выбранным подразделениям
Fig. 7. Summary of selected departments

В аспекте обеспечения доступности эта аналитика позволяет оценить «загруженность» тех или иных служб, выявить «узкие места» и снизить риски срыва поставленных производственных задач в силу значительного количества избыточных («паразитных») циклов согласования. В определенном смысле этот отчет позволяет выявить подразделения,

имеющие критичное влияния на обеспечение доступности ЭД для всей компании (например, в силу монопольного ресурса на согласование финансовых лимитов). Для ЛПР крайне важно представление четких, измеримых и унифицированных показателей, например, аналитический срез по проценту несогласованных документов (рис. 8). В аспекте обеспечения ИБ этот дополнительный показатель может успешно решать обратную задачу – как «целевое» подразделение (например, отдел документационного обеспечения) обеспечивает фильтрацию недостаточно качественных документов (подготовленных «на авось»), прохождение которых через СЭД может нанести ущерб интересам организации.

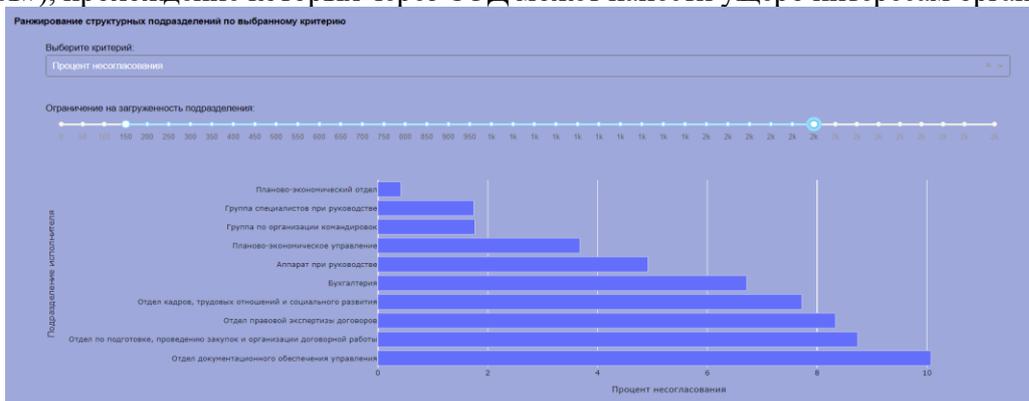


Рис. 8. Ранжирование подразделений по показателю
Fig. 8. Ranking of departments by indicator

Вывод. В представленной публикации рассматривается новая математическая модель СЭД, позволяющая определить численно показатель доступности ЭД с учетом УБИ и выполнять оптимизацию с учетом сложной организационной структуры современных организаций. Предложенная модель обладает новизной: введены новые показатели степени обеспечения ИБ и представлен пример определения доступности при обработке ЭД в конкретной реализации СЭД.

В представленной новой модели могут применять дополнительные показатели обеспечения ИБ, отражающие специфику движения ЭД в корпоративных СЭД. Предложенная модель дополнительно позволяет идентифицировать уязвимости в СЭД, которые могут быть использованы для реализации новых (ранее не документированных) УБИ и содействовать повышению уровня обеспечения ИБ в проектах СЭД.

Библиографический список:

1. 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
2. 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.
3. Лившиц И.И. Практика управления киберрисками в нефтегазовых проектах компаний холдингового типа. Вопросы кибербезопасности. – 2020. - №1 (35). – С. 42 – 51.
4. Круковский М.Ю. Концепция построения моделей композитного документооборота / Математические машины и системы. – 2004. – №2. – С. 149 – 163. EDN: RPCPIH
5. Куприянов Ю.В., Морев С.А. Теоретико-множественная модель системы управления организацией // Алгоритмы, модели и системы обработки данных. – 2006. – №11. – С. 178-183
6. Ланцев Е.А., Доррер М.Г. Агентное имитационное моделирование бизнес-процессов в нотации EPC//Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. – № 3 (85). – С. 86-92.
7. Елисеев Н.И., Тали Д.И., Обланенко А.А. Оценка уровня защищенности автоматизированных информационных систем юридически значимого электронного документооборота на основе логико-вероятностного метода // Вопросы кибербезопасности. – 2019. – № 6 (34). – С. 7-16. EDN: NIKLQN, DOI: 10.21681/2311-3456-2019-6-07-16

8. Минаев В.А., Королев И.Д., Мазин А.В., Мезенцев А.С., Поддубный М.И. Обоснование формальных систем математической логики для решения задач автоматического электронного документооборота // Радиопромышленность. 2018. № 2. С. 105-114. EDN: XQYSTJ
9. Язов Ю.К. К вопросу об оценке эффективности защиты информации в системах электронного документооборота / Язов Ю.К., Авсентьев О.С., Рубцова И.О. – Вопросы кибербезопасности. – 2019. – №1(29). EDN: YZFWPB, DOI: 10.21681/2311-3456-2019-1-25-34
10. Дровникова И.Г., Алфёров В.П., Овчинникова Е.С. Математическая модель динамики функционирования подсистемы защиты конфиденциальных сведений в системах электронного документооборота // Охрана, безопасность, связь. 2020. № 5-3. С. 175-182. EDN: BKUXCX
11. Краснянский М.Н., Обухов А.Д., Коробова И.Л. Математическая модель обработки информации в системе управления электронным документооборотом//Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2018. – Т. 24.–№3.–С.382-399. EDN: YQOAUH DOI: 10.17277/vestnik.2018.03.pp.382-399
12. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. Учебник для студентов вузов / Сер. Высшее образование. (9е издание, стереотипное) Москва, 2003.
13. <https://www.securitylab.ru/news/530833.php>
14. <https://www.securitylab.ru/news/537510.php>

References:

1. 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)
2. 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)
3. Livshits I.I. Cyber risk management practice in oil and gas projects of holding-type companies. *Cybersecurity issues*. 2020; 1 (35): 42 – 51. (In Russ)
4. Krukovsky M.Yu. Concept of constructing composite document flow models. *Mathematical machines and systems*. 2004;2:149 – 163. EDN: RPCPIH (In Russ)
5. Kupriyanov Yu.V., Morev S.A. Set-theoretical model of the organization management system. *Algorithms, models and data processing systems*. 2006;11: 178-183 (In Russ)
6. Lancev E.A., Dorrer M.G. Agent-based simulation modeling of business processes in the EEPС notation. *Scientific and technical bulletin of information technologies, mechanics and optics*. 2013; 3 (85): 86-92.
7. Eliseev N.I., Tali D.I., Oblanenko A.A. Assessment of the security level of automated information systems of legally significant electronic document management based on the logical-probabilistic method. *Cybersecurity Issues*. 2019; 6 (34): 7-16. EDN: HIKLQN, DOI: 10.21681/2311-3456-2019-6-07-16 (In Russ)
8. Minaev V.A., Korolev I.D., Mazin A.V., Mezentsev A.S., Poddubny M.I. Justification of formal systems of mathematical logic for solving problems of automatic electronic document management. *Radio industry*. 2018; 2:105-114. EDN: XQYSTJ (In Russ)
9. Yazov Yu.K. On the issue of assessing the effectiveness of information protection in electronic document management systems / Yazov Yu.K., Avsentyev O.S., Rubtsova I.O. *Cybersecurity Issues*. 2019;1 (29). EDN: YZFWPB, DOI: 10.21681 / 2311-3456-2019-1-25-34 (In Russ)
10. Drovnikova I.G., Alferov V.P., Ovchinnikova E.S. Mathematical model of the dynamics of the functioning of the subsystem for the protection of confidential information in electronic document management systems. *Security, Safety, Communications*. 2020; 5-3:175-182. EDN: BKUXCX (In Russ)
11. Krasnyansky M.N., Obukhov A.D., Korobova I.L. Mathematical model of information processing in the electronic document management system. *Bulletin of Tambov State Technical University*. 2018; 24(3):. 382-399. EDN: YQOAUH DOI: 10.17277/vestnik.2018;03:382-399 (In Russ)
12. Ventzel E.S. Probability Theory. Textbook for University Students / Series: Higher Education. (9th edition, stereotyped) Moscow, 2003. (In Russ)
13. <https://www.securitylab.ru/news/530833.php>
14. <https://www.securitylab.ru/news/537510.php>

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 18.06. 2024.

Одобрена после рецензирования/ Revised 22.07.2024.

Принята в печать/ Accepted for publication 12.10.2024.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 338.3:621.391:[004.5+004.67]



DOI: 10.21822/2073-6185-2024-51-4-112-122 Оригинальная статья /Original article

О гипотезе уравнения состояния технической системы

Д.И. Лобач

Департамент по ядерной и радиационной безопасности Министерства
по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь,
220030, г.Минск, ул.Берсона, 16, Республика Беларусь

Резюме. Цель. Цель исследования заключается в формулировке и демонстрации потенциальных дополнительных экспертных возможностей и гипотезы для повышения качества рассмотрения проектов технических систем при сочетании анализа технических характеристик проекта и параметров влияния человеческого фактора. **Метод.** В работе рассматривается получение инвариантных соотношений для некоторых характеристик технических систем, на основании которых формулируется гипотеза уравнения состояния технической системы. **Результат.** Результат исследования состоит в разработке и развитии вспомогательных аналитических подходов для сравнения отдельных эксплуатационных параметров проектов, проведения экспертной оценки новых и существующих технических систем проектов, устройств и технологий в ходе осуществления экспертной деятельности. Применение гипотезы уравнения состояния технической системы позволяет проводить экспертные оценки безопасности технической системы. **Вывод.** Использование дополнительных экспертных подходов и гипотез позволяет провести наработку опыта экспертных оценок для сравнения проектов, корреляционный анализ данных, определение потенциальных возможностей в контексте осуществления дальнейших модификаций и модернизаций технических систем проекта, выработать улучшенные эксплуатационные прогнозы и стратегии, осуществить принятие адекватных управленческих решений.

Ключевые слова: экспертная оценка, безопасность, сэйфеометрика, уравнение состояния, техническая система, человеческий фактор, стратегия, прогноз.

Для цитирования: Д.И. Лобач. О гипотезе уравнения состояния технической системы. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2024; 51(4):112-122. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-4-112-122

On the hypothesis of the equation for technical system state

D.J. Lobach

Department on nuclear and radiation safety of Ministry on emergency situations
of the Republic of Belarus,
16 Bersona Str. Minsk 220030, Belarus

Abstract. Objective. The objective of the study is to formulate and demonstrate potential additional expert capabilities and a hypothesis to improve the quality of technical system projects by combining the analysis of technical characteristics of the project and human factor influence parameters. **Method.** The paper considers obtaining invariant relationships for some characteristics of technical systems, on the basis of which a hypothesis of the equation of state of a technical system is formulated. **Result.** Auxiliary analytical approaches have been developed to compare individual operational parameters of projects, conduct an expert assessment of technical systems of projects, devices and technologies. The use of the hypothesis of the equation of state of a technical system allows for expert assessments of the safety of a technical system. **Conclusion.** The use of additional expert approaches and hypotheses allows for the accumulation of experience in expert assessments, correlation analysis of data, determination of potential capabilities in the context of further modifications and upgrades of technical systems of the pro-

ject, development of improved operational forecasts and strategies, and adoption of adequate management decisions.

Keywords: expert assessment, safety, safeometrics, equation of state, technical system, human factor, strategy, forecast.

For citation: D.J. Lobach. On the hypothesis of the equation for technical system state. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2024;51(4):112-122. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-4-112-122

Введение. Для успешного продвижения в различных сферах экономики коммерческих проектов технических систем (далее – ТС) требуется подтверждение необходимости или целесообразности использования комплектующего оборудования проекта, его обоснованность для конкретных эксплуатационных условий [1-3]. Это относится как к атомной промышленности, так и к другим отраслям. Наличие дополнительных элементов, блоков и т.п. для дублирования важных технологических процессов, решения производственных задач, а также создания запаса безопасности может увеличивать стоимость проекта любого объекта. Важно учитывать комплексность задач при проектировании ТС, которое, как итерационный процесс, сочетает процедуры описания ТС и их анализа [4]. Применение вспомогательных устройств должно быть аргументировано и в ходе экспертной оценки следует продемонстрировать (показать), как их использование влияет на безопасную эксплуатацию техники в организации.

Состояния безопасности проектов ТС могут иметь неопределённости в требованиях к качеству данных для нестандартных эксплуатационных ситуаций, а экспертный анализ ТС и пути принятия управленческих решений связаны с обеспечением безопасности функционирования структурно-сложных систем [5,6]. В ходе организации и проведения экспертных работ необходимо провести классификацию предстоящих задач для оценки безопасности ТС и выбрать оптимальные методы анализа [7].

При недостатке экспертных данных и опыта для подтверждения уровня безопасности проектов ТС вспомогательные методы сэйфеометрики для оценки параметров технологий позволяют получить возможность наглядного и относительного количественного сравнения характеристик для такой ситуации [8-10]. В некоторых случаях при недостатке компетентности специалистов и из-за распространения у них клипового мышления [11] применение дополнительных методов оценки безопасности позволяет проверить состояние техники, удостовериться в поддержании требуемого уровня безопасности, также при этом повышается наглядность реакций ТС на команды и действия управления.

В организациях часто важно оценить, как соответствует уровень безопасности ТС состоянию культуры безопасности (далее – КБ), профессионализму специалистов, отношению работников в коллективах (их дух, настроение) к поддержанию безопасности [12-14]. Для этого надо определить при каких условиях можно сопоставить (сравнить влияние, оценить корреляцию) изменению технических параметров систем или суперпозиции таких параметров ТС характеристики влияния человеческого фактора (далее – ЧФ) на производстве или их изменение, чтобы рассмотреть является ли сформированная в организации КБ адекватной или соответствует состоянию ТС, требуемому уровню безопасности. Проверку таких соотношений нельзя провести измерением величин с достоверной статистикой экспериментальными методами, поэтому во многих случаях следует руководствоваться правдоподобными эмпирическими закономерностями и гипотезами.

Постановка задачи. Надёжность и риски событий для новых проектов обычно ещё недостаточно рассчитаны и изучены, а сами инновационные технологии могут быть не проверены и ещё себя не зарекомендовали. Аналогичная ситуация для ТС происходит в отношении практики и опыта их эксплуатации и регулирования безопасности.

Тема подтверждения или демонстрации безопасности инновационных технологий возникает, например, в свете динамичных разработок и ожидаемых (декларируемых)

сроков внедрения передовых конструкций ядерных реакторов как для абсолютно новых, так и с использованием или опирающихся на инновационные технологии для существующих систем, компонентов, материалов, технологий производства, возведения, строительства. К настоящему времени подобное комплексное рассмотрение проблематики оценки возможностей и безопасности проектов ТС с подготовкой отдельного документа для экспертного рассмотрения проводится в Международном агентстве по атомной энергии [3]. В проектах атомных электростанций внедряются инновационные технологии, используются новые подходы и концепции на уровне компонентов и систем, как и в других сферах экономики, где тоже вкладываются значительные финансовые ресурсы и требуется высокая конкурентоспособность для продвижения новых технологий.

Следует отметить, что затраты на финансирование и поддержание требуемого уровня безопасности ТС составляют часть экономики производства. Поэтому можно сказать, что безопасность входит в число экономических категорий. В [3] приводится неполный перечень вопросов, с которыми можно столкнуться при подтверждении или демонстрации безопасности инновационных технологий, где особое значение могут иметь полное отсутствие информации или опыта по некоторым ключевым направлениям. Эти вопросы требуют пояснений и детализаций с учётом конкретных условий реализации проектов ТС. Если в ходе экспертных оценок или экспертиз перечисленные проблемы не рассмотреть и не решить, то будут поставлены под сомнение способность разработчиков, операторов и других заинтересованных сторон обеспечить демонстрацию безопасности инновационной технологии. Также это вызовет отсутствие доказательств и подтверждений должного уровня безопасности для регулирующего государственного органа, который не будет способен принимать компетентные и своевременные решения о безопасности конструкций реакторов, использующих инновационную технологию, например, для предоставления лицензии, разрешительных документов и т.д.

Использовать методы количественной оценки уровня безопасности для последующего сравнения и методы для расчёта риска аварий это не одно и то же. Но это и не отменяет одно другое, а дополняет друг друга. Для этих подходов различаются как постановка задачи, так и их результат, практическая значимость. В целях оценки безопасности при рассмотрении проектов ТС с перечисленными проблемами новых технологий использование традиционных подходов основано на использовании термодинамических величин и состояний, которые исследуются в ходе наработки эксплуатационного опыта. Этого недостаточно при работе экспертов для анализа быстро реализуемых задач.

Для экспертных оценок и экспертиз важно иметь в наличии арсенал вспомогательных методов сравнения, опирающихся на имеющиеся в распоряжение данные и не требующих значительного дополнительного времени их наработки. На основании методологии сэйфгеометрики использование сравнения количественного изменения уровня безопасности или других показателей базируется на их различии или изменении для старых и новых технологий, в ходе применения новых технологических решений, изменении одних показателей при фиксировании других характеристик [8-10]. Полученные в ходе анализа количественные закономерности (например, в ходе *DATA MINING*) могут быть использованы для относительного или рейтингового сравнения проектируемых, планируемых или применяемых технологий без использования длительной наработки экспериментальных данных. Использование сравнительного подхода позволяет провести первичную оценку преимуществ как внедрения инновационных технологий в действующие проекты, так и для существующих устройств.

Необходим глубокий всесторонний анализ и описание практического проявления связей, возможности их записи в математической форме. В дальнейшем, правдоподобные эмпирические закономерности экспертом должны быть имплементированы к каждой конкретной ситуации (имеется понимание связей между параметрами и потенциалами, интерпретация работы проекта ТС, проведены анализы минимизации возможных негатив-

ных последствий от работы системы, повышения эффективности показателей проекта, устойчивости функционирования системы, реализации механизмов восстановления работоспособности, осуществлено накопление данных). Изменение и совершенствование проектов или применение новых технологических решений, по которым эксперту надо проводить анализ, подтверждение и демонстрацию их новых признаков, осуществляется по разным направлениям. Реальные ТС сложны и комплексны, поэтому для практического понимания их функционирования экспертами часто используются модельные условности, например, при рассмотрении можно полагать, что системы независимы, тождественны, однородны, а влияние организационных действий и человеческого фактора происходит одинаково на все составляющие элементы.

Методы исследования. Главная задача аналитиков при проведении экспертных рассмотрений состояния безопасности ТС – оценить параметры проекта и сравнить их с данными от референтных конструкций, ранее реализованных аналогов, технологиями конкурентов, уточнить условия функционирования ТС и достигнутый уровень безопасности. Комплексные количественные показатели в сфере безопасности не могут быть измерены абсолютными методами, приборами. Эксперту следует ориентироваться на имеющиеся и подходящие эмпирические закономерности и выражения для них [8].

В [9,10] было показано, что для оценки уровня безопасности системы можно использовать как абсолютные величины, параметры сэйфеометрики (например, N_{PC} – количество рабочих систем (далее – РС); N_{CB} – количество систем безопасности (далее – СБ) для рассматриваемого технического объекта, M_{Φ} – количество проектных или запроектных факторов опасности (предписанных событий или отказов или иного, на усмотрение эксперта) для этого технического объекта), так и относительные характеристики, удобные для понимания и рассмотрения – потенциалы сэйфеометрики (например, $\alpha = N_{CB}/M_{\Phi}$ – степень опасности; $\tau = N_{CB}/N_{PC}$ – уровень технической оснащённости СБ; $\Theta = 1/\tau = N_{PC}/N_{CB}$ – технологической насыщенностью проекта (в контексте оснащённости рабочим оборудованием, техническими комплексами и т.п.)). Вышеуказанные характеристики являются детерминированными величинами (в том числе базируются на конкретных характеристиках проекта). Уровень безопасности ТС Q , зависящий только от таких параметров, тоже будет детерминированной величиной.

Технические характеристики проекта, его КПД могут быть ослаблены неэффективным применением ТС. Это происходит по причине участия в эксплуатационном процессе работников с разным уровнем профессионализма. Их отношение к своей деятельности в совокупности с их компетентностью формируют систему КБ в организации [14-16]. КБ, влияющая на уровень безопасности Q зависит от ЧФ у сотрудников и связана со случайными величинами проявления ЧФ на индивидуальном и организационном уровне [12,13]. Такая связь может быть показана двумя величинами: R_{CSC} (показатель организационной (коллективной) культуры безопасности, групповой фактор, $R_{CSC} \in]0; 1]$) и R_{ISC} (показатель индивидуальной (персональной) культуры безопасности, личный фактор, $R_{ISC} \in]0; 1]$) и характеризоваться плотностью распределения вероятности $p(R_{CSC}, R_{ISC})$. Значения этих показателей могут быть определены по-отдельности в ходе проведения анкетирования, опросов или исследований [7-11]. Из теории вероятностей известно, что когда одномерные переменные R_{CSC} и R_{ISC} будут являться статистически независимыми, тогда для всех возможных значений этих переменных выполняется условие $p(R_{CSC}, R_{ISC}) = p(R_{CSC})p(R_{ISC})$, где $p(R_{CSC})$ и $p(R_{ISC})$ – их одномерные плотности распределения вероятности. Однако при использовании подходов математической статистики R_{CSC} может зависеть от R_{ISC} , и это надо учитывать при экспертной оценке.

Показателям организационной и индивидуальной КБ в любой момент времени, в любое состояние ТС можно сопоставить показатель комплексной КБ R_{SC} . Его величина $R_{SC} = (R_{CSC} \times R_{ISC})$, где R_{CSC} и R_{ISC} значения соответствующих случайных величин. Для средних величин оценка проводится аналогично. Полагаем, что R_{CSC} и (или) R_{ISC} не могут

принимать нулевые значения, иначе это будет значить несистемное, неорганизованное, непрофессиональное функционирование (в хаотичных условиях), когда безопасность невозможно обеспечить.

Следует заметить, что свойства и параметры проекта непосредственно определяют степень угрозы ТС организации для работников, населения и окружающей среды (например, химические предприятия, объекты атомной энергетики и др.) [15]. Технологическая насыщенность проекта Θ формирует и характеризует его диверсионную технологическую привлекательность для проведения несанкционированных действий, поскольку это определяет тяжесть последствий от саботажа и т.п. Привлекательными для злоумышленников могут быть и низкие уровни КБ, формирующие негативные эффекты ЧФ в организации, и высокая зависимость ТС от влияния ЧФ. Обычно предварительно собираются сведения об имеющихся уязвимостях для определения и выбора «слабых» мест производств, путей вмешательства при планировании и организации таких действий. Где имеются в проекте ТС места с бóльшим технологическим риском, влиянием ЧФ, там больше уязвимостей, на которые направлено внимание злоумышленников и которые используются при проведении несанкционированных действий [14]. В работе [9] был представлен частный инвариант для потенциалов сэйфеометрики: $\alpha \times Q = const$ для систем с разными значениями τ . Обобщённые инварианты для потенциалов и показателей сэйфеометрики были получены в работе [10]:

$$\frac{\alpha \times Q}{\tau} = const \text{ или } \frac{N_{PC} \times Q}{M_{\Phi}} = const . \quad (1)$$

Эти закономерности будем использовать для последующих рассуждений об оценке и анализе параметров состояний ТС.

Обсуждение результатов. Относительное сравнение состояний ТС с использованием инвариантов. Главная задача проводимого здесь экспертом анализа – как ТС будет переходить из одного состояния в другое, что при этом будет происходить, к чему это приведёт для функционирования проекта и к чему надо быть готовым при эксплуатации.

Технические характеристики проекта ТС, условий его реализации (внешние условия) являются физическими детерминированными параметрами. Другие характеристики, в которых реализуется проект, например, саботаж с влиянием ЧФ, уровень КБ (внутренние свойства управления и коллектива), представляющие собой совокупность внутренних свойств, возможностей, недостатков, достоинств, не могут быть измерены и являются случайными, могут быть описаны вероятностными величинами.

Рассмотрение (1) проводится в предположении, что, если для одной и той же системы, когда влияние ЧФ одинаково (по условиям или проявлению) и представлено в организационной и индивидуальной КБ (в целом) или за промежуток времени, когда изменение влияния ЧФ пренебрежимо мало. Для двух состояний одной и той же ТС из (1) можно получить уравнения:

$$\frac{\alpha_1 \times Q_1}{\tau_1} = \frac{\alpha_2 \times Q_2}{\tau_2} \text{ или } \frac{N_{PC1} \times Q_1}{M_{\Phi 1}} = \frac{N_{PC2} \times Q_2}{M_{\Phi 2}} . \quad (2)$$

Схематично рассмотрение разных состояний ТС можно провести на рис. 1 ($M_{\Phi 1} < M_{\Phi 2}$). Изменение состояний ТС можно рассмотреть на рис. 1 с использованием нескольких частных инвариантов параметров сэйфеометрики:

1. Создание запаса безопасности при $Q = const$ или для переходов с Q_1 или Q_2 ($Q_2 > Q_1$) может происходить при увеличении использования дополнительных РС с их СБ ($N_{PCD} < N_{PCB} < N_{PCA} < N_{PCE}$). Чем меньше был начальный уровень безопасности, тем больше надо вовлечь в использование РС с их СБ. Переход ТС для состояний DA и BE означает охват бóльшего количества M_{Φ} ($M_{\Phi 1} < M_{\Phi 2}$) $\Rightarrow \Delta N_{PC}(M_{\Phi 1}) = N_{PCB} - N_{PCD} < N_{PCE} - N_{PCA} = \Delta N_{PC}(M_{\Phi 2})$.

2. При уменьшении M_{Φ} $\Delta(M_{\Phi 2} - M_{\Phi 1})$ уровень безопасности можно снизить в Q_2/Q_1 раз для $N_{PC} = const$.

3. Удержание более высокого уровня безопасности $\Delta Q \geq 0$ можно произвести с уменьшением количества РС ΔN_{PC} и (или) ΔM_{Φ} . При увеличении ΔN_{PC} и ΔM_{Φ} требуется увеличить уровень безопасности ТС.

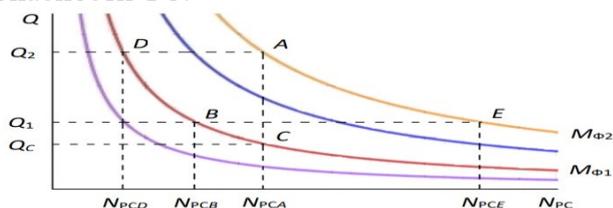


Рис.1. Изменение уровня безопасности Q в зависимости от количества рабочих систем N_{PC} для разных величин проектных или запроектных факторов опасности M_{Φ}

Fig.1. The change in the level of safety Q depending on the number of operating systems N_{PC} for different values of design or beyond design hazard factors M_{Φ}

Гипотеза уравнения состояния ТС. Эксплуатационное состояние ТС может быть описано как детерминированными, так и вероятностными характеристиками. В работах [9,10] показано, что подходящие априорные параметры проекта удобно использовать для оценки безопасности ТС.

Введём понятие идеальной ТС, которая может включаться/выключаться и функционировать отдельно от других таких же ТС. Все такие ТС не имеют связи между собой (модель, упрощение рассмотрения). Их строение в ходе работы не рассматривается. Функционирование самой ТС может быть рассмотрено, как отдельной подсистемы.

Введём характеристики внутренних свойств ТС: $Y = L \times R_{CSC} \times R_{ISC}$, L – показатель независимости работы ТС от ЧФ, характеризуется степенью автономности, показывает долю автоматизированных процедур, $L \in]0; 1]$. Коэффициент Y характеризует внутренние свойства, реагирование системы при усилении влияния ЧФ, устойчивость к ЧФ или восстановление ТС при его действии, $Y \in]0; 1]$.

Для $R_{CSC} \times R_{ISC} < 1$ значение $L = \beta$, где β – степень автономности [9] $\beta \in]0; 1]$ (при $\beta=1$ – максимальная автономность), для компенсации ЧФ требуется повышенная автономность (дополнительное оснащение, автоматизация и т.п.). С уменьшением использования технологий с участием людей коэффициент $L \in]1; L_{MAX}]$, где $L_{MAX} = 1/(R_{CSC} \times R_{ISC})$ (запроектная степень автономности), требуемая для компенсации всех эффектов, связанных с влиянием ЧФ в рамках функционирования ТС. Поскольку в эксплуатации ТС необходимы люди (работники), то очевидно, что уменьшение ЧФ не может быть достигнуто с неизменной численностью коллектива. Поэтому при уменьшении количества людей будет уменьшаться влияние ЧФ на ТС. Это будет возможно при введении в проект ТС дополнительной автономности (до L_{MAX}).

Система должна иметь минимальное техническое оснащение, которое должно быть в наличии и использоваться по прямому назначению, быть в работоспособном состоянии ($L \neq 0$). При действии ЧФ экспертная оценка наиболее удобна, если рассмотрение проводится для непрерывного влияния ЧФ или при возможности исключить ЧФ. Если же для влияния ЧФ требуются определённые условия (в ТС есть или формируются «скачки» условий), то необходимо либо рассмотреть состояния ТС для разных условий (с ЧФ и без ЧФ), либо определить причины этого и исключить возможность возникновения таких разных состояний ТС. Величина ζ , запроектный коэффициент, потенциал, который характеризует запас безопасности проекта, улучшение проекта при его модификациях или модернизациях. До $Y \leq 1$ значение $\zeta=1$, а при достижении Y своей максимальной величины 1 увеличение $\frac{N_{PC} \times Q}{M_{\Phi}}$ может быть связано с увеличением ζ . При идеальных условиях проведения работ в организации ($R_{CSC} \times R_{ISC} \approx 1$, $\beta=1$), для ТС с максимальной рабочей эффективностью (ТС в идеальном состоянии) $\frac{N_{PC} \times Q}{M_{\Phi}} = 1$ (обобщённый инвариант) в относительных единицах (далее – отн.ед.), при $Y=1$ отн.ед..

В инвариантах (1) имеются структурные элементы, которые можно дополнительно рассмотреть и интерпретировать: $N_{PC} \times Q$ – эффективное количество РС за счёт учёта всех факторов на безопасность Q ; $\alpha \times Q$ – эффективное влияние всех СБ на безопасность ТС за счёт учёта всех существующих факторов; величина Q/M_{Φ} показывает то, что факторы M_{Φ} действуют на ослабление безопасности Q , обусловленной текущим значением Y и способствуют уменьшению эффективности работы всех РС. Полагаем, что все РС работают при действии всех M_{Φ} , а при $Y > 1$ отн.ед. РС работают эффективнее при действии тех же M_{Φ} .

При указанных предположениях, с учётом свойств функциональных зависимостей гиперболического типа, состояние любой ТС в любое время можно гипотетически представить уравнениями следующего вида (уравнения состояния идеальной ТС):

$$\frac{N_{PC} \times Q}{M_{\Phi}} = \zeta \times L \times R_{CSC} \times R_{ISC} \quad (3.1)$$

$$\frac{\alpha \times Q}{\tau} = \zeta \times L \times R_{CSC} \times R_{ISC} \quad (3.2)$$

Уравнения (3.1)-(3.2) позволяют оценить (определить) одни параметры эксплуатации ТС через другие на основании обобщения эмпирических наблюдений и построения правдоподобных логических выводов. Размерность левой и правой части уравнений соответствуют друг другу ([отн.ед]≡[отн.ед]), эти параметры характеризуют состояние ТС с разных позиций рассмотрения в отн.ед.. Сами эти величины корреспондируются друг другу (соответствуют в рамках их интерпретации). Все реальные ТС имеют как особенности построения, эксплуатации, взаимодействия с окружающими факторами, так и общие свойства, которые характеризуют идеальную ТС (модель). Схематично переход ТС между различными состояниями можно рассмотреть на рис. 2 ($\tau_2 > \tau_1$).

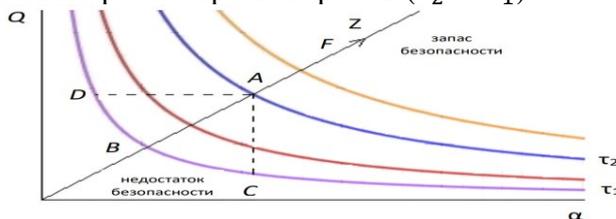


Рис. 2. Изменение уровня безопасности ТС Q в зависимости от степени опасности α для систем с разным уровнем технической оснащённости СБ τ

Fig. 2. Changes in the safety level of TS Q depending on the degree of danger α for systems with different levels of technical equipment of SS τ

Внедрение автоматизации, уменьшение использования людей повышают уровень безопасности, что увеличивает величину Q . В таком случае $L > 1$ и это будет показывать, как система откликается на уменьшение влияния ЧФ.

При $Y > 1$, когда запас безопасности высок ($A \rightarrow F$), то и влияние ЧФ на ТС либо ничтожно, либо компенсируется в рамках запроектных характеристик, следует полагать, что система входит в состояние с более высоким уровнем безопасности. В этом состоянии системе требуется меньше персонала с ЧФ, либо вообще работники не требуются, возможно ей управляет искусственный интеллект или восполнение безопасности происходит постоянно и это экономически неограничено. При $Y=1$ осуществляется полное использование потенциала проекта ТС (100%). Эффекты влияния ЧФ на ТС сведены к минимуму или нулю ($R_{CSC} \times R_{ISC} \approx 1$, $\beta=1$, т.е. имеется на практике максимальная автономность, состояние без влияния ЧФ, например, автоматизация). Для состояния $Y=1$ имеется технический рубеж, когда ТС своими возможностями преодолевает влияние ЧФ. До этого ЧФ препятствует проектному функционированию ТС и эффективность ТС, используемых технологий меньше 100%. Для $Y > 1$ за счёт модернизаций, совершенствования рабочих процедур и управления ТС, замены работников на технологии без участия людей: $\frac{N_{PC} \times Q}{M_{\Phi}} > 1 \Rightarrow$ при уменьшении количества внешних, препятствующих факторов M_{Φ} уменьшается необходимость в дополнительных усилиях по обеспечению безопасности, свойствах ТС

по понижению уровня опасности (при учёте всех аспектов охраны труда работников, технической и других видов обеспечения безопасности, должном обслуживании технических устройств (проведение своевременных осмотров, диагностик, ремонтов и т.п.)). Ось-вектор Z (греч. дзетта, для рассмотрения параметра ζ) – шкала запаса, резерва безопасности проекта, запроектной устойчивости. Это характеристика возможностей и потенциала системы, скрытых свойств, управления, запроектных возможностей, которые появились в ходе усовершенствований проекта (модификаций или модернизаций).

Пусть в точке A $Y=1$, тогда при переходе ТС из состояния A к B Y уменьшается (на AB $Y \rightarrow 0$). Переход ТС от B к A может осуществляться при $(R_{CSC} \times R_{ISC}) \rightarrow 1$ и $\beta \rightarrow 1$. При изменении состояния ТС из A к F Y увеличивается (например, происходит переход на полную автономность). Это можно осуществить при увеличении ζ и (или) уменьшении M_Φ (при тех же N_{PC} и N_{CB}). Обобщённый анализ уравнений (3.1)-(3.2) показывает наличие трёх семейств состояний ТС:

1. *Состояние ТС при $Y=1$* : Здесь выполняется обобщённый инвариант, который соответствует на графике гиперболы, характеризуемой показателями или потенциалами сэйфеометрики для проектного состояния ТС (без учёта влияния ЧФ ($R_{ISC} = 1, R_{CSC} = 1$) и $\beta=1$).

2. *Состояние ТС при $Y<1$* : Гиперболы, расположенные ближе к началу координат, характеризуют инварианты для состояния ТС в области с недостатком безопасности. Для этих состояний $L \times R_{CSC} \times R_{ISC} < 1, L \leq 1, R_{ISC} \leq 1, R_{CSC} < 1$ (если $R_{ISC} < 1 \Rightarrow R_{CSC} \neq 1$). Такое сопоставление инварианта и Y является правдоподобным.

3. *Состояние ТС при $Y>1$* : Здесь ТС будет иметь запас (резерв) безопасности. Такое состояние может наступить при уменьшении количества работников и повышении степени автономности, автоматизации и роботизации, т.е. $L \in]1; L_{MAX}]$. Это компенсирует влияние ЧФ и недостаточность для R_{ISC} и R_{CSC} . Здесь при эксплуатации ТС начинает играть роль потенциал ζ . В целом переход ТС от $Y=1$ в область $Y<1$ или $Y>1$ в меньшей степени зависит от изменения показателей самой ТС, оборудования, устройства (только от того, что заложено проектом). Такой переход зависит от вовлечения в работу ТС и управление людей с ЧФ (наличием или отсутствием у них профессиональных качеств и адаптационных к системой работе свойств их личности), влияния ЧФ на технологию, зависит от внутренних характеристик системы (которые могли появиться уже после реализации проекта, например, дополнительное оборудование, создание условий для персонала, изменение эргономики производства), характеристик группы персонала (как коллектива в целом) и организационной структуры.

Вывод. По результатам проведенного анализа необходимо сделать выводы и дать рекомендации в части возможных или необходимых изменений в организации производства и труда по вопросам эксплуатации и управления ТС. Уравнение состояния ТС позволяет проанализировать как КБ уменьшает уровень безопасности в системе. В направлении вдоль AB (рис.2) параметр Y будет уменьшаться из-за уменьшения уровня КБ в организации. В этом случае уровень безопасности в системе уменьшается, а сама система становится более чувствительной к влиянию внешних факторов. Все изменения параметров, входящих в Y , определяют внутренние условия обеспечения безопасности и реагирования на внешние факторы. Эксперту важно отметить, как для разных производственных ситуаций и времени изменяется уровень безопасности и КБ. Эффективное значение КБ в организации является суперпозицией организационной и индивидуальной КБ. Отдельные коэффициенты можно определить по специализированным методикам. Для более глубокой проработки влияния ЧФ на уровень безопасности надо иметь несколько методик оценки КБ в организации. При проведении анализа эксперту будет полезно сравнить результаты (для изучения корреляций данных), полученные от применения других методик оценки [9-11]. Использование уравнений (3.1)-(3.2) позволяет, зная погрешности в определении одних величин, определить ошибки оценки для других параметров [17-19]. Применение различ-

ных подходов даёт эксперту возможность, исключая маловероятные данные приблизиться к максимально правдоподобному рассмотрению закономерностей, получить достаточную, эффективную или асимптотически эффективную оценку различных соотношений и статистике параметров для этого.

Можно оценить минимальный приемлемый уровень КБ, чтобы поддерживать безопасность систем, противодействовать внешней угрозе (вреда от несанкционированного действия), минимальные значения уровня безопасности в системе для несанкционированных действий, уточнить какое для таких задач требуется иметь минимальное, критическое количество N_{PC} с N_{CB} (или Θ). Эксперту целесообразно дать предложения в эксплуатационные стратегии реализации проекта, рекомендации для эксплуатации в пределах изменения M_{Φ} , вариаций использования N_{PC} или N_{CB} , оценить как надо или можно технически повысить возможности ТС.

Гипотеза (3.1)-(3.2) позволяет получить для рассмотрения многофакторную зависимость для уровня безопасности ТС Q , сформулировать задачи для одно и двух факторных анализов, например, для функции $Q = Q(R_{ISC}, R_{CSC})$. В результате этого эксперт, в зависимости от своих целей и замысла анализа, может для выделенных соотношений величин провести корреляционный и дисперсионный анализ влияющих на Q факторов [19].

Применение дополнительных методов оценки технологий позволяет сделать прогноз изменения уровня безопасности ТС при изменении проектных и запроектных параметров системы. Количественная экспертная оценка с использованием гипотезы уравнения состояния ТС позволяет в ходе эксплуатации одновременно рассматривать технические параметры проекта и влияние на них ЧФ. Это предоставляет возможность построения инвариантных соотношений между разными величинами [9,10], проведения анализа имеющихся характеристик методами математической статистики [17-19].

Основная проблема приведенной в статье гипотезы заключается в том, что все сформулированные с её помощью выводы будут базироваться на допущениях и предположениях, сделанных при рассмотрении обобщённых инвариантов и связей уровня профессионализма и КБ с уровнем безопасности ТС. Этот вопрос находится в разрезе закона научной индукции [12], поэтому важно обозначать условия применения гипотезы и учитывать принцип правдоподобия (результаты последующих оценок будут эквивалентны первоначальному (исходному) анализу). Уравнения (3.1)-(3.2) базируются на свойстве инвариантности в соотношениях (1), что является аргументом того, что оценка с применением гипотезы может проводиться с максимальным правдоподобием.

Для проведения анализа важно иметь представление о взаимовлияниях технических характеристик проекта и существующего в организации уровня действия ЧФ, сформированного системой обеспечения КБ. Использование моделирования и прогнозирования состояний ТС в разрезе вспомогательных подходов и методологий, например, сэйфеометрики [8], должно опираться только на правдоподобную интерпретацию результатов анализа.

В ходе проведения рассмотрений и экспертных оценок проектов ТС, с учётом меняющейся квалификации специалистов в отрасли [11], возникают такие вопросы, например, как рассматривать инновационные технологии, можно ли доверять прежним эксплуатационным данным или надо использовать вспомогательный аналитический аппарат, новые средства сбора и обработки информации. С одной стороны, инновационные технологии могут иметь разный уровень эксплуатационного опыта, наработок. С другой стороны, совершенствуется нормативное регулирование, уточняются или ужесточаются требования безопасности к технологиям. Зачастую опытные эксперты проводят параллели, сравнения рассматриваемого проекта объекта с существующими (современными, проверенными и т.п.) конструкциями. Дополнительные рекомендации для выбора конкретных стратегий экспертной работы и регулирования безопасности, которым должны следовать разработчики и пользователи технологий, работники регулирующих органов при рас-

смотрении вопросов безопасности ТС для инновационных технологий, подтверждения безопасного их использования надо искать в аналитических материалах исследований безопасности по следующим аспектам:

- разработка общих требований к проекту, которым должна соответствовать инновационная технология;
- применение разных подходов и средств сбора данных для проектирования и анализа безопасности, включая рассмотрение результатов испытаний и экспериментов;
- результаты оценки безопасности, включая анализ безопасности, оценки инженерных аспектов, человеческого фактора и долгосрочной безопасности, проверки и валидации расчётных кодов и тестирования на этапе проектирования и лицензирования;
- информация о ходе конструирования, изготовления, внедрения, предэксплуатационных испытаний, а также квалификации вовлечённых специалистов;
- проблемы в ходе срока службы конструкции, такие как старение и деградация, в управлении отходами, решение вопроса о выводе из эксплуатации (по проекту и фактически);
- проведение в ходе анализа поиска новых данных о функционировании проекта.

Вспомогательные методы оценки могут служить для подтверждения или уточнения намерений специалистов и руководителей организации при принятии ими решений, обоснованности проведения модификаций и модернизаций проекта в условиях влияния ЧФ.

Библиографический список:

1. Safety assessment for facilities and activities. General safety requirements. International Atomic Energy Agency. IAEA safety standards series, No.GSR Part4(Rev.1).–Vienna: International Atomic Energy Agency, 2016.
2. Safety of nuclear power plants : design. Specific safety requirements. International Atomic Energy Agency. IAEA safety standards series, No. SSR-2/1 (Rev.1). – Vienna: International Atomic Energy Agency, 2016.
3. SPESS F Document Preparation Profile (DPP) Version 4 dated 06 October 2022. DS537. Safety demonstration of innovative technology in power reactor designs [Электронный ресурс] // International Atomic Energy Agency. 2022. <https://www.iaea.org/sites/default/files/dpp537.pdf>
4. Норенков, И.П., Арутюнян, Н.М. Эволюционные методы в задачах выбора проектных решений. Машиностроение и компьютерные технологии. сентябрь 2007. [Электронный ресурс] <https://cyberleninka.ru/journal/n/mashinostroenie-i-kompyuternye-tehnologii?i=854303>
5. Бочков А.В. О методах качественной оценки состояния безопасности структурно-сложных систем // Надежность. – 2020. – № 20(3). – С. 34-46. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2020-20-3-34-46>
6. Бочков, А.В. О методе синтеза рисков в управлении безопасностью структурно-сложных систем// Надежность. – 2020. – № 20(1). – С. 57-67. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2020-20-1-57-67>
7. Газизов, Т.Т. Классификация методов глобальной оптимизации для решения задач безопасности / Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, часть 1, июнь 2008. – 2008. – № 2 (18). – С. 130-131.
8. Лобач, Д. И. Новые проблемы, методология и возможности сэйфеометрики / Д. И. Лобач // Промышленная безопасность. – 2023. – № 01. – С. 34-36. ISSN 2958-4523.
9. Лобач, Д.И. О развитии экспертных возможностей для рассмотрения проектов оборудования и технологических решений / Д. И. Лобач // Системный анализ и прикладная информатика. – 2023. – № 2. – С. 38-41. <https://doi.org/10.21122/2309-4923-2023-2-38-41>
10. Лобач, Д.И. О развитии подходов системной оценки безопасности при проектировании технических систем / Д.И.Лобач // Онтология проектирования. – 2023. – Т.13. – №4(50). – С.615-624. <https://doi.org/10.18287/2223-9537-2023-13-4-615-624>.
11. Ковалев, М. М. Образование для цифровой экономики / М. М. Ковалев // Цифровая трансформация. – 2018. – № 1 (2). – С. 37–42.
12. Человеческий фактор и безопасность ядерных установок. Материалы Международной конференции МК-2000 / Москва, Обнинск : ОНИЦ «Прогноз», 2001.
13. Абрамова, В.Н. Организационная психология, организационная культура и культура безопасности в атомной энергетике. – Москва, Обнинск : ИГ – СОЦИН, 2009.
14. Safety culture, Safety series, No.75-INSAG-4, a report by the International Nuclear Safety Advisory Group. – Vienna: International Atomic Energy Agency, 1991.

15. Examples of safety culture practices, Safety reports series, No.1. – Vienna: International Atomic Energy Agency, 1997.
16. Key practical issues in strengthening safety culture, Safety series, No. INSAG-15, a report by the International Nuclear Safety Advisory Group. – Vienna: International Atomic Energy Agency, 2002.
17. Hudson, D.J. Statistics. Lectures on Elementary Statistics and Probability, Geneva, 1964,.
18. Тейлор, Дж. Введение в теорию ошибок. – М., 1985.
19. Колде, Я.К. Практикум по теории вероятности и математической статистике. – М., 1991.

References:

1. Safety assessment for facilities and activities. General safety requirements. International Atomic Energy Agency. IAEA safety standards series, GSR Part4 (Rev.1).Vienna:International Atomic Energy Agency; 2016.
2. Safety of nuclear power plants : design. Specific safety requirements. International Atomic Energy Agency. IAEA safety standards series, no. SSR-2/1 (Rev. 1) . Vienna: International Atomic Energy Agency; 2016.
3. SPSS F Document Preparation Profile (DPP) Version 4 dated 06 October 2022. DS537. Safety demonstration of innovative technology in power reactor designs [Electronic resource]. International Atomic Energy Agency, 2022. <https://www.iaea.org/sites/default/files/dpp537.pdf>
4. Norenkov I.P., Harutyunyan N.M. Evolutionary methods in the problems of choosing design solutions. Mechanical engineering and computer technology, september 2007 [Electronic resource]. <https://cyberleninka.ru/journal/n/mashinostroenie-i-kompyuternye-tehnologii?i=854303> (In Russ.)
5. Bochkov A.V. On the methods of qualitative estimation of the safety state of structurally complex systems. Dependability. 2020; 20(3): 34-46. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2020-20-3-34-46> (In Russ.)
6. Bochkov A.V. On the method of risk synthesis in the safety management of structurally complex systems. Dependability. 2020; 20(1): 57-67. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2020-20-1-57-67> (In Russ.)
7. Gázizov T.T. Global optimization method classification on security problems solution. Proceedings of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. 2008; 2(18): 130-131. (In Russ.)
8. Lobach D.J. New problems, methodology and possibilities of Safeometrics . Promyšlennaâ bezopasnost'. 2023; 01: 34-36. ISSN 2958-4523. (In Russ.)
9. Lobach D.J. About development of expert possibilities for consideration of equipment projects and technological decisions . System analysis and applied information science. 2023; 02: 38-41. <https://doi.org/10.21122/2309-4923-2023-2-38-41> (In Russ.)
10. Lobach D.J. On the development of approaches to system safety assessment in the design of technical systems. Ontology of designing. 2023; 13(4): 615-624. <https://doi.org/10.18287/2223-9537-2023-13-4-615-624>. (In Russ.)
11. Kovalev M. M. Education for the Digital Economy. Digital transformation. 2018; 1(2): 37–42. (In Russ.)
12. The human factor and the safety of nuclear installations. Materials of the International conference MK-2000 . Moscow, Obninsk : ONITS "Forecast"; 2001. (In Russ.)
13. Abramova V.N. Organizational psychology, organizational culture and safety culture in atomic energy . Moscow, Obninsk : IG – SOCIN; 2009. (In Russ.)
14. Safety culture, Safety series, No.75-INSAG-4, a report by the International Nuclear Safety Advisory Group. Vienna: International Atomic Energy Agency; 1991.
15. Examples of safety culture practices, Safety reports series, No.1. Vienna: International Atomic Energy Agency; 1997.
16. Key practical issues in strengthening safety culture, Safety series, No.INSAG-15, a report by the International Nuclear Safety Advisory Group. Vienna: International Atomic Energy Agency; 2002.
17. Hudson D.J. Statistics. Lectures on Elementary Statistics and Probability, Geneva, 1964 (In Russ.).
18. Taylor J. Introduction to the theory of errors. M.; 1985. (In Russ.)
19. Kolde Ya.K. Practicum on probability theory and mathematical statistics. M.; 1991. (In Russ.)

Сведения об авторе:

Лобач Дмитрий Иосифович, кандидат технических наук, гражданский государственный служащий в отставке; lobachd@yandex.ru ORCID: 0000-0001-5512-0032 ResearcherID: HKN-7220-2023

Information about the author:

Dmitry J. Lobach, Cand. Sci. (Eng), Retired Civil Servant; lobachd@yandex.ru ORCID: 0000-0001-5512-0032 ResearcherID: HKN-7220-2023

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/ Received 18.06.2024.

Одобрена после рецензирования / Revided 25.07.2024.

Принята в печать /Accepted for publication 25.10.2024.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 004.42



DOI: 10.21822/2073-6185-2024-51-4-123-129 Оригинальная статья/ Original article

О способах установки координат указателя мыши в случае альтернативных вариантов построения человеко-компьютерного взаимодействия

П.В. Пересунько

Сибирский федеральный университет,
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является сравнение и обобщение разных способов бесконтактной установки координат указателя мыши компьютера. **Метод.** Для создания бесконтактного интерфейса человек-машина используются технологии компьютерного зрения для выделения управляющей точки на кадре видеокамеры, с помощью которых перемещается курсор компьютера на мониторе пользователя. Используются общелогические методы научного исследования, а именно – обобщение. Проведен анализ рассмотренных систем управления координатами курсора с выделением общих частей для дальнейшего обобщения и описания формул установки координат курсора мыши компьютера. Для анализа были взяты научные работы с абсолютным позиционированием курсора компьютера и работы с контролем сдвига положения курсора относительно его координат на предыдущем кадре. **Результат.** В результате анализа были указаны сильные и слабые стороны каждого из рассматриваемых подходов. В абсолютном позиционировании требуется меньше времени для установки курсора в нужную позицию. Определено, что контроль сдвига курсора не такой требовательный к точности расчета координат управляющей точки. Приведены формулы, с помощью которых обобщаются способы перемещения курсора компьютера. **Вывод.** Предложенный подход к расчету новых координат указателя мыши позволяет реализовать в программной системе оба представленных подхода позиционирования курсора компьютера, так как каждый из них имеет преимущества в зависимости от конкретной ситуации.

Ключевые слова: управление курсором мыши; вспомогательные технологии; взаимодействие человек-компьютер; взаимодействие человек-машина; компьютерное зрение

Для цитирования: П.В. Пересунько. О способах установки координат указателя мыши в случае альтернативных вариантов построения человеко-компьютерного взаимодействия. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2024; 51(4):123-129. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-4-123-129

On methods of setting the coordinates of the mouse pointer in the case of alternative options for constructing human-computer interaction

P.V. Peresunko

Siberian Federal University,
79 Svobodny Ave., Krasnoyarsk 660041, Russia

Abstract. Objective. The aim of the study is to compare and generalize different methods of contactless setting of computer mouse pointer coordinates. **Method.** To create a contactless human-machine interface, computer vision technologies are used to select a control point on a video camera frame, with the help of which the computer cursor is moved on the user's monitor. General logical methods of scientific research, namely, generalization, are used. An analysis of the considered cursor coordinate control systems is carried out with the allocation of common parts for further generalization and description of formulas for setting the coordinates of the computer mouse cursor. Scientific works with absolute positioning of the computer cursor and works with control of the cursor position shift relative to its coordinates on the previous frame

were taken for analysis. **Result.** As a result of the analysis, strengths and weaknesses of each of the approaches under consideration were indicated. Absolute positioning requires less time to set the cursor to the desired position. It is determined that cursor shift control is not so demanding on the accuracy of calculating the coordinates of the control point. Formulas are given that generalize the methods of moving the computer cursor. **Conclusion.** The proposed approach to calculating new coordinates of the mouse pointer allows implementing both presented approaches to positioning the computer cursor in the software system, since each of them has advantages depending on the specific situation.

Keywords: mouse cursor control; assistive technologies; human-computer interaction; human-machine interaction; computer vision

For citation: P.V. Peresunko. On methods of setting the coordinates of the mouse pointer in the case of alternative options for constructing human-computer interaction. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2024;51(4):123-129. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-4-123-129

Введение. В современном мире персональный компьютер активно внедрился в жизнь человека. Помимо широко распространенных сценариев использования компьютера, таких как работа, развлекательный досуг, доставка различных товаров, он используется в целях реабилитации пациентов. С помощью него возможно реализовать биологическую обратную связь, например, с помощью управления указателем мыши. В свою очередь управление указателем мыши можно использовать для геймификация процесса реабилитации пациентов. Например, он управляется теми движениями, которые необходимо выполнять для восстановления пациента. Но кроме геймификации, альтернативные способы управления указателем мыши могут быть использованы в том случае, если применение стандартных способов манипуляции курсора, например с помощью компьютерной мыши, джойстика, компьютерного планшета, трекбола, невозможно.

Существуют разные альтернативные варианты управления курсором компьютера [1]. В общем случае их можно разделить на контактные, бесконтактные и гибридные способы. К контактным относятся управление с помощью электромиограммы [2], электропалатографии [3] (искусственное небо с электродами), оптико-светодиодного сенсора, установленного в ротовую область [4], джойстик для управления ртом [5]. Преимуществом таких способов является физический контакт пользователя с управляющим устройством, что может дать ему ощущение контроля над компьютером. Но минусом подобных систем является их покупка в специализированных магазинах, проблемы логистического характера, а также возможность их поломки. Бесконтактные же способы используют, как правило, периферийные устройства ввода, которые уже есть в большинстве ноутбуках, или их можно купить в обычных компьютерных магазинах. Этими устройствами ввода являются веб-камера и микрофон. К гибридному способу относится окулография [6], которая, как правило, реализована в виде шлема с видеокамерами, с помощью которых отслеживается положение зрачков для перемещения курсора. С одной стороны, пользователь не осуществляет непосредственного контакта с датчиками, однако для увеличения точности распознавания направления взгляда видеокамеры размещаются вблизи глаз.

В данной статье под управлением курсором рассматриваются методы для установки координат курсора мыши. Для эмуляции нажатия левой кнопки мыши может использоваться другой признак, например, в [7] использовалось расстояние между верхней и нижней губой, или эмуляция нажатия левой кнопки мыши происходит в том случае, если курсор не выходит за границы области вокруг курсора в течение определенного времени задержки. Размер области и время задержки являются параметрами системы. Итого, цель данного исследования – сравнить и обобщить разные системы установки координат указателя мыши компьютера.

Постановка задачи. Видеокамера подключена к компьютеру, на котором будет происходить контроль координаты курсора. Она направлена на оператора, в поле зрения видеокамеры попадает управляющий курсором объект. На рис.1.а слева изображена рука пользователя и видеокамера, управляющим объектом является ногтевая фаланга указательного пальца. На рис.1.б слева изображен кадр видеокамеры с прямоугольником активной области, где происходит считывание координаты объекта. Справа изображен монитор пользователя с курсором. При перемещении руки влево курсор тоже движется влево. В данном случае необходимо в режиме реального времени установить курсор компьютера на координаты $(x_s(t), y_s(t))$ на мониторе в зависимости от координат управляющей точки (УТ) на кадре с видеокамеры, где $x_s = 0, \dots, N_s - 1, y_s = 0, \dots, M_s - 1, N_s$ – количество пикселей монитора в ширину, M_s – количество пикселей монитора в высоту. В качестве УТ выступает координата объекта на кадре видеокамеры.



Рис. 1. а) управление координатами курсора с помощью видеокамеры, вид сбоку; б) слева – кадр с видеокамеры, управляющий объект – ногтевая фаланга указательного пальца, вид спереди, справа – монитор пользователя

Fig. 1. a) control of cursor coordinates using a video camera, side view; b) on the left – a frame from a video camera, the control object is the nail phalanx of the index finger, front view, on the right – the user's monitor

Методы исследования. В абсолютном позиционировании курсора врач устанавливает прямоугольную область перемещения УТ на кадре верхним левым углом с координатами (x_1, y_1) и нижним правым углом с координатами (x_2, y_2) . Тогда координата $x_s(t)$ курсора на экране по оси абсцисс в момент времени t определяется формулой

$$x_s(t) = \begin{cases} 0, & x_m(t) \leq x_1 \\ \left[\frac{x_m(t) - x_1}{x_2 - x_1 + 1} N_c \right], & x_1 < x_m(t) < x_2 \\ N_s - 1, & x_m(t) \geq x_2 \end{cases}$$

где $x_m(t)$ – положение маркера по оси абсцисс в момент времени t ,
 x_1 – координаты левого края прямоугольника активной области,
 x_2 – координаты правого края прямоугольника активной области,
 N_s – количество пикселей монитора по оси абсцисс.

Аналогичной формулой рассчитывается положение курсора по оси ординат. Подобный способ позиционирования используется во многих исследованиях и программных продуктах, например в MLI. Mouse [8] и Camera Mouse [9]. В последнем указывается чувствительность к перемещению управляющей точки по каждой оси, таким образом задавая размер активной области. В работе [10] тоже предлагается перемещать курсор пропорционально перемещению маркера на видео, что может быть выполнено с помощью предложенной формулы. В работе [11] авторы использовали абсолютное позиционирование курсора, так как в случае медленной обработки кадров на устройстве получалось быстрее перемещать курсор в нужную область. В [12] авторы тоже используют абсолютное позиционирование, активная область совпадает со всем полем зрения камеры.

В [13] авторы использовали абсолютные перемещения курсора в зависимости от угла поворота головы. На рис.2.а показана схема абсолютного позиционирования курсора.

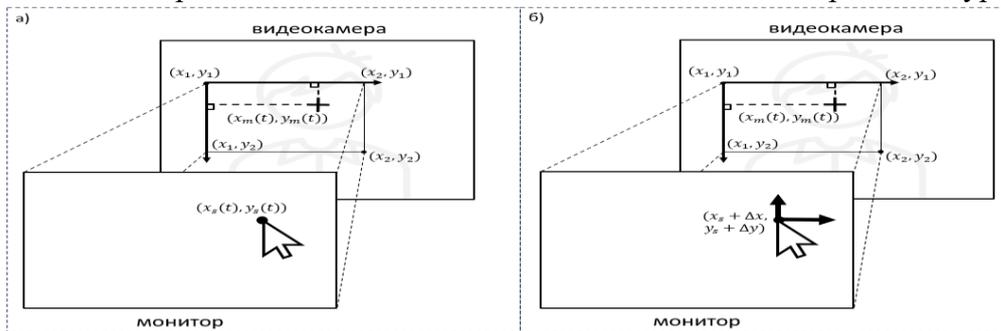


Рис. 2. а) Пример абсолютного управления. На рисунке пользователь задает координаты курсора мыши с помощью носа. б) Курсор мыши перемещается вверх направо на соответствующий сдвиг.

Fig. 2. a) An example of absolute control. In the figure, the user coordinates the mouse cursor using his nose. b) The mouse cursor moves up to the right by the corresponding shift.

Альтернативным вариантом управления координатами курсора является контроль сдвига курсора относительно координаты его положения на прошлом шаге (рис. 2.б). Например, при одномерном перемещении курсора по оси абсцисс новое положение рассчитывается по формуле

$$x_s(t) = x_s(t - 1) + [\Delta x_s(t)],$$

где x_s – положение курсора на экране,

Δx_s – размер сдвига.

Например, сдвиг по оси абсцисс может быть рассчитан по формуле

$$\Delta x_s(t) = \begin{cases} -v, & x_m(t) \leq \theta_1, \\ 0, & \theta_1 < x_m(t) < \theta_2, \\ v, & x_m(t) \geq \theta_2, \end{cases}$$

где v – размер сдвига (скорость) передвижения курсора по оси абсцисс, целое число,

θ_1 – порог для движения влево,

θ_2 – порог для движения вправо.

Из минусов такого подхода можно отметить то, что если курсор двигается, то скорость передвижения остается константной вне зависимости от расстояния УТ от центральной точки. Поэтому, если скорость установлена высокая, то пользователю сложно остановиться в необходимой области, а если низкая – то пользователю необходимо много времени для перемещения курсора до нужной области.

Однако, в системе возможны и другие варианты установки зависимости для расчета сдвига, например, как в формуле

$$\Delta x_s(t) = \begin{cases} k(x_m(t) - \theta_1), & x_m(t) \leq \theta_1, \\ 0, & \theta_1 < x_m(t) < \theta_2, \\ k(x_m(t) - \theta_2), & x_m(t) \geq \theta_2, \end{cases},$$

где v_1 и v_2 – размер сдвига и скорость передвижения курсора по оси x^c ,

θ_1 – порог для движения влево,

θ_2 – порог для движения вправо,

k – коэффициент скорости перемещения курсора.

С этой формулой положения УТ от θ_1 до θ_2 не будут влиять на положение курсора, а благодаря линейной функции пользователь сможет перемещать курсор как на короткие расстояния благодаря маленькому сдвигу, так и на большие благодаря возрастающему по модулю значению шага в зависимости от расстояния до θ_1 или θ_2 .

Расчет сдвига позиции курсора тоже активно используется в управлении курсором с помощью компьютерного зрения. В работе [14] определяется направление головы для перемещения курсора с фиксированным по размеру сдвигом. В работах [15, 16] движение тоже происходит в одну из восьми сторон с фиксированным сдвигом. В [17] оценивают направление головы человека, и в зависимости от угла поворота перемещается курсор.

Обсуждение результатов. Итого, имея одинаковый способ расчета положения УТ, в системе могут быть реализованы разные способы позиционирования курсора компьютера, что и реализовано в системе MLI Mouse [8].

Исследования указывают, что при абсолютном позиционировании пользователь способен быстрее переместить курсор на нужную область, например, решать двумерную задачу взаимного постукивания. Кроме этого, такой способ позиционирования является понятным для пользователя, так как устанавливает позицию курсора «как есть», то есть при движении УТ вправо курсор тоже двигается направо, а при остановке передвижения УТ курсор тоже не двигается.

Однако стоит обратить внимание на то, что шумы в распознавании положения УТ сильно влияют на передвижение курсора, например, сдвиг в размере 5% от размера активной области создает сдвиг на 5% от размера экрана. Например, при ширине экрана 1920 это будет 96 пикселей, что слишком много, особенно с кликом с помощью ЛКМ при отсутствии перемещения курсора. В этом случае установка маленькой области для срабатывания нажатия сделает его маловероятным, а увеличение этой области увеличивает количество ложных нажатий.

К преимуществам расчета сдвига позиции курсора можно отнести низкие требования к точности способов определения координат УТ. Как пример, далее указаны случаи без использования компьютерного зрения, у которых количество значений управляющего сигнала для расчета значительно меньше количества пикселей по одной из осей экрана для абсолютного позиционирования курсора. Например, в работе [18] система определяла направление движения с помощью электропалатографии и перемещала курсор в эту сторону с постоянной скоростью. Похожим образом происходит перемещение курсора с помощью языка [19]. В программном обеспечении Vocal Joystick [20] курсор передвигается с помощью звуков, которые издает пользователь. Звуком пользователь устанавливает направление для перемещения курсора.

Кроме того, на систему не так сильно влияют шумы. Во-первых, если положение УТ из-за ошибок в обнаружении изменяется в области, в которой не происходит движения, курсор в любом случае не двигается. Во-вторых, если курсор уже двигается в какую-то сторону, то незначительный шум может в худшем случае изменить скорость перемещения движения курсора, что не сильно заметно пользователю.

Вывод. Проведенное исследование свидетельствует о необходимости для систем управления указателя мыши с помощью компьютерного зрения в реализации обоих способов установки координат курсора компьютера, так как выбор лучшего подхода зависит от конкретной ситуации. В системах, основанной на управлении курсором с помощью трекирования управляющей точки, можно реализовать оба подхода.

Библиографический список:

1. Пересунько П.В. Обзор методов построения взаимодействия человек - компьютер в задаче управления курсором компьютера // Труды "НПЦАП". Системы и приборы управления. 2022. № 4(62). С. 26–39.
2. Будко Н.А., Медведев М.Ю., Будко А.Ю. Разработка и исследование метода векторного анализа ЭМГ предплечья для построения человеко-машинных интерфейсов // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2021. № 2. С. 18–31.
3. Khan M.M., Sherazi H.I., Quain R. Tongue-Supported Human-Computer Interaction systems: a review. 36th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, USA, Chicago, 2014, pp. 1410–1415.

4. IntegraMouse Plus – the mouth controlled mouse. IntegraMouse Plus [сайт]. URL: <https://www.integramouse.com/en/home/> (дата обращения: 21.06.2024).
5. IntegraMouse Plus – the mouth controlled mouse. IntegraMouse Plus [сайт]. URL: <https://www.integramouse.com/en/home/> (дата обращения: 21.06.2024).
6. Rawlani S., Biyani P., Juneja S. Eye Tracking- An Extensive Evaluation of a Contemporary and Ingenious Technology. *International Journal of Computer Applications*, 2018, vol. 179, no. 54. pp. 5–11.
7. Zuniga R., Magee J. Camera Mouse: Dwell vs. Computer Vision-Based Intentional Click Activation // *Universal Access in Human–Computer Interaction. Designing Novel Interactions. UAHCI 2017. Lecture Notes in Computer Science / Antona, M., Stephanidis, C. (eds). 2017. Vol. 10278. https://doi.org/10.1007/978-3-319-58703-5_34*
8. Peresunko P., Pleshkova E., Semizorova A., Kovalev I. MLI. Mouse: a new computer vision-based cursor control software // *V International Workshop on Modeling, Information Processing and Computing (MIP: Computing-V-2022) : Conference Proceedings, Krasnoyarsk, 25 January 2022. Krasnoyarsk : CEUR-WS, 2022. Vol. 3091. P. 60–65. DOI: 10.47813/dnit-mip5/2022-3091-60-65.*
9. Betke M., Gips J., Fleming P. The camera mouse: visual tracking of body features to provide computer access for people with severe disabilities // *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng.* 2002. Vol. 10 (1). P. 1-10. DOI: 10.1109/TNSRE.2002.1021581.
10. Varun K.S., Puneeth I., Jacob T. P. Virtual Mouse Implementation using Open CV // *2019 3rd International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICOEI). Tirunelveli. India. 2019. P. 435-438. DOI: 10.1109/ICOEI.2019.8862764.*
11. Niyazi K., Kumar V., Mahe S., Vyawahare S. Mouse Simulation Using Two Coloured Tapes. *International Journal of Information Sciences and Techniques*, vol. 2, no. 2, pp. 57–63.
12. Park Hojoon. A Method for Controlling Mouse Movement using a Real-Time Camera. 2009. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:18232695> (дата обращения: 21.06.2024).
13. Nabati M., Behrad A. 3D Head pose estimation and camera mouse implementation using a monocular video camera. *Signal, Image and Video Processing*, 2015, vol. 9, pp. 39–44.
14. Song Y., Luo Y., Lin J. Detection of Movements of Head and Mouth to Provide Computer Access for Disabled // *2011 International Conference on Technologies and Applications of Artificial Intelligence. Taiwan. 2011. P. 223–226.*
15. Khan F., Halim B., Rahman A. Computer Vision Based Mouse Control Using Object Detection and Marker Motion Tracking. *International Journal of Computer Science and Mobile Computing*, 2020, vol. 9, iss. 5, pp. 35–45.
16. Salvi M., Kegade Sh., Shinde A., Tekwani B. Cursor manipulation with hand recognition using computer vision. *IT in Industry*, 2021, vol. 9, no. 1, pp. 1455–1456.
17. Fu Y., Huang T. S. hMouse: Head Tracking Driven Virtual Computer Mouse // *2007 IEEE Workshop on Applications of Computer Vision (WACV '07. Austin. TX. USA. 2007. P. 30-30. DOI: 10.1109/WACV.2007.29.*
18. Reyes López, D. Design of an electromyographic mouse / D. Reyes López, C. Cifuentes López // *20th Symposium on Signal Processing, Images and Computer Vision (STSIIVA) : сборник научных трудов. – Colombia, Bogota, 2015.*
19. Kim, J. Tongue-operated assistive technology with access to common smartphone applications via Bluetooth link / J. Kim, H. Park, M. Ghovanloo // *Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society: сборник научных трудов. – USA, San Diego, 2012.*
20. The Vocal Joystick: Evaluation of voice-based cursor control techniques for assistive technology / S. Harada [и др.] // *Disability and Rehabilitation: Assistive Technology. – 2008. – Т. 3, № 1. – С. 22–34.*

References:

1. Peresunko P.V. Review of techniques for developing human - computer interactions in the challenge of computer cursor control. *Products "NPTSAP". Systems and control devices.* 2022; 4(62): 26–39. (In Russ).
2. Budko H.A., Medvedev M.Y., Budko A.Y. Development and research of a method for vector analysis of forearm EMG for the construction of Human-Machine Interfaces. *News of the Southern Federal University. Technical science.* 2021;2:18–31 (In Russ).
3. Khan M.M., Sherazi H.I., Quain R. Tongue-Supported Human-Computer Interaction systems: a review. *36th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, USA, Chicago, 2014;1410–1415.*
4. IntegraMouse Plus – the mouth controlled mouse. IntegraMouse Plus [сайт]. URL: <https://www.integramouse.com/en/home/> (access date: 21/06/2024).
5. IntegraMouse Plus – the mouth controlled mouse. IntegraMouse Plus [сайт]. URL: <https://www.integramouse.com/en/home/> (access date: 21/06/2024).

6. Rawlani S., Biyani P., Juneja S. Eye Tracking- An Extensive Evaluation of a Contemporary and Ingenious Technology. *International Journal of Computer Applications*, 2018;179(54): 5–11.
7. Zuniga R., Magee J. Camera Mouse: Dwell vs. Computer Vision-Based Intentional Click Activation // Universal Access in Human–Computer Interaction. Designing Novel Interactions. UAHCI 2017. Lecture Notes in Computer Science. Antona, M., Stephanidis, C. (eds). 2017;10278. https://doi.org/10.1007/978-3-319-58703-5_34
8. Автор, Pleshkova E., Semizorova A., Kovalev I. MLI. Mouse: a new computer vision-based cursor control software. *V International Workshop on Modeling, Information Processing and Computing (MIP: Computing-V-2022)* : Conference Proceedings, Krasnoyarsk, 25 January 2022. Krasnoyarsk : CEUR-WS, 2022; 3091: 60–65. DOI: 10.47813/dnit-mip5/2022-3091-60-65.
9. Betke M., Gips J., Fleming P. The camera mouse: visual tracking of body features to provide computer access for people with severe disabilities. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*. 2002; 10 (1): 1-10. DOI: 10.1109/TNSRE.2002.1021581.
10. Varun K.S., Puneeth I., Jacob T. P. Virtual Mouse Implementation using Open CV // 2019 3rd International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICOEI). Tirunelveli. India. 2019; 435-438. DOI: 10.1109/ICOEI.2019.8862764.
11. Niyazi K., Kumar V., Mahe S., Vyawahare S. Mouse Simulation Using Two Coloured Tapes. *International Journal of Information Sciences and Techniques*, 2: 2: 57–63.
12. Park Hojoon. A Method for Controlling Mouse Movement using a Real-Time Camera. 2009. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:18232695> (access date: 21.06.2024).
13. Nabati M., Behrad A. 3D Head pose estimation and camera mouse implementation using a monocular video camera. *Signal, Image and Video Processing*, 2015; 9: 39–44.
14. Song Y., Luo Y., Lin J. Detection of Movements of Head and Mouth to Provide Computer Access for Disabled // 2011 International Conference on Technologies and Applications of Artificial Intelligence. Taiwan. 2011;223–226.
15. Khan F., Halim B., Rahman A. Computer Vision Based Mouse Control Using Object Detection and Marker Motion Tracking. *International Journal of Computer Science and Mobile Computing*, 2020; 9, (5):pp. 35–45.
16. Salvi M., Kegade Sh., Shinde A., Tekwani B. Cursor manipulation with hand recognition using computer vision. *IT in Industry*, 2021; 9(1):1455–1456.
17. Fu Y., Huang T. S. hMouse: Head Tracking Driven Virtual Computer Mouse // 2007 IEEE Workshop on Applications of Computer Vision (WACV '07. Austin. TX. USA. 2007;30-30. DOI: 10.1109/WACV.2007.29.
18. Reyes López, D. Design of an electromyographic mouse / D. Reyes López, C. Cifuentes López // 20th Symposium on Signal Processing, Images and Computer Vision (STSIVA) Colombia, Bogota, 2015.
19. Kim, J. Tongue-operated assistive technology with access to common smartphone applications via Bluetooth link / J. Kim, H. Park, M. Ghovanloo // Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. – USA, San Diego, 2012.
20. The Vocal Joystick: Evaluation of voice-based cursor control techniques for assistive technology / S. Harada. *Disability and Rehabilitation: Assistive Technology*. 2008; 3(1): 22–34.

Сведения об авторе:

Пересунко Павел Викторович, старший преподаватель научно-учебной лаборатории программного обеспечения кафедры «Программная инженерия», Институт космических и информационных технологий; pvperesunko@yandex.ru; ORCID: 0000-0003-3708-129X

Information about the author:

Pavel V. Peresunko, Senior Lecturer, Scientific and Educational laboratory of software, Department of Software Engineering, Institute of Space and Information Technologies; pvperesunko@yandex.ru; ORCID: 0000-0003-3708-129X

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/ Received 22.06.2024.

Одобрена после рецензирования / Reviced 30. 07.2024.

Принята в печать /Accepted for publication 10.10.2024.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 004.832,2



DOI: 10.21822/2073-6185-2024-51-4-130-143

Оригинальная статья/ Original article

**Алгоритм для определения степени уязвимости участков облачных
вычислений на основе метода ELECTRE I**

С.В. Разумников

Юргинский технологический институт (филиал) Национального исследовательского
Томского политехнического университета (ЮТИ ТПУ),
652055, г. Юрга, ул. Ленинградская, 26, Россия

Резюме. Цель. В принятии решений при сравнении альтернатив часто приходится работать с различными значениями или оценками, которые еще имеют важность. Одним из методов многокритериального анализа, который может быть применен в модели определения уязвимости участков облачных вычислений является метод ELECTRE I. Данная статья представляет алгоритм для определения степени уязвимости участков облачных вычислений с использованием метода Electre I. **Метод.** Метод Electre I позволяет оценить относительные преимущества и недостатки различных участков облачных вычислений на основе набора критериев. **Результат.** Алгоритм, представленный в статье, включает в себя шаги для определения весов критериев, оценки альтернатив в соответствии с этими критериями и вычисления степени уязвимости. Данная модель позволит определить участок или участки, которые наиболее подвержены опасности поломки или выхода из строя, и удалить доминируемые альтернативы, которые не представляют серьезной опасности. На основе выявленных предпочтений можно принять решение об устранении неполадок по выбранным участкам облачного сервиса. Экспериментальное исследование проведено на основе реальных данных о системе облачных вычислений. **Вывод.** Полученные результаты подтверждают эффективность предложенного метода и его способность точно определить уязвимости участков облачных вычислений. Результаты этой работы могут быть полезны для администраторов облачных систем и специалистов по безопасности, которые заботятся о поддержании безопасности и надежности в облачной среде.

Ключевые слова: облачные сервисы, уязвимости, метод ELECTRE I, многокритериальная задача оптимизации, множество недоминируемых альтернатив

Для цитирования: С.В. Разумников. Алгоритм для определения степени уязвимости участков облачных вычислений на основе метода ELECTRE I. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2024;51(4):130-143. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-4-130-143

**Algorithm for determining the degree of vulnerability of cloud computing areas based
on the electre i method**

S.V. Razumnikov

26 Leningradskaya St., Yurga 652055, Russia

Abstract. Objective. In decision making when comparing alternatives, it is often necessary to work with different values or estimates that are still important. One of the multicriteria analysis methods that can be applied in the model for determining the vulnerability of cloud computing areas is the ELECTRE I method. This paper presents an algorithm for determining the degree of vulnerability of cloud computing areas using the Electre I method. **Method.** The Electre I method allows one to evaluate the relative advantages and disadvantages of different cloud computing areas based on a set of criteria. **Result.** The algorithm presented in the paper includes steps for determining the weights of criteria, evaluating alternatives according

to these criteria, and calculating the degree of vulnerability. This model will allow one to determine the area or areas that are most susceptible to the danger of breakdown or failure, and to remove dominated alternatives that do not pose a serious danger. Based on the identified preferences, one can make a decision on troubleshooting the selected areas of the cloud service. An experimental study was conducted on the basis of real data on the cloud computing system. **Conclusion.** The obtained results confirm the effectiveness of the proposed method and its ability to accurately determine the vulnerabilities of cloud computing areas. The results of this work may be useful for cloud system administrators and security professionals who are concerned about maintaining security and reliability in the cloud environment.

Keywords: cloud services, vulnerabilities, ELECTRE I method, multicriteria optimization problem, set of non-dominated alternatives

For citation: S.V. Razumnikov. Algorithm for determining the degree of vulnerability of cloud computing areas based on the electre i method. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2024; 51(4):130-143. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-4-130-143

Введение. Облачные технологии оказывают все большее влияние на современный бизнес и IT-сектор. Они предоставляют гибкость, масштабируемость и доступность, что делает их актуальными для организаций всех размеров и отраслей [1, 2]. После выбора облачных сервисов для использования и их внедрения на предприятии следующим этапом их жизненного цикла становится сопровождение, управление их работой [3-5, 17, 18]. Облачные вычисления являются ключевой технологией в современных информационных системах, но они также могут стать объектом атак и уязвимостей. Поэтому важно иметь инструменты и методы для оценки и определения уязвимых участков в облачных вычислениях [6, 7].

В принятии решений при проведении анализа необходимо учитывать различные критерии при оценке и сравнении альтернатив. Для проведения оценки в такой ситуации хорошо зарекомендовали себя бинарные отношения и теория графов [8, 9]. Одним из методов многокритериального анализа, который может быть применен в модели определения уязвимости участков облачных вычислений – это метод ELECTRE I. В современном бизнесе и управлении сложные проблемы часто требуют принятия решений с учетом нескольких критериев или факторов. Метод ELECTRE I позволяет учитывать и выравнять различные критерии при принятии решений, что делает его крайне полезным для реальных проблем. Он успешно применяется в различных областях, включая бизнес, экономику, инженерию, экологию и управление проектами. Применение метода ELECTRE I позволяет сформировать ранжированный список участков облачных вычислений по степени их уязвимости.

На основе этого метода предлагается модель по определению степени уязвимости участков облачных вычислений, что позволит выявить наиболее подверженные опасности поломки и принять решение, что устранять в первую очередь.

Постановка задачи. В статье представлена модель в виде алгоритма для определения степени уязвимости участков облачных вычислений на основе метода ELECTRE I. Применение метода ELECTRE I позволяет сформировать ранжированный список участков облачных вычислений по степени их уязвимости. Вместе с тем, следует учитывать следующие достоинства и недостатки применения данного метода:

Достоинства:

1. Учет многокритериальности: Метод Electre I позволяет учитывать несколько критериев при оценке и сравнении альтернатив, что позволяет более полно учесть особенности участков облачных вычислений и их уязвимости.

2. Понятность и прозрачность: Результаты применения метода Electre I представляются в виде ранжированного списка, что позволяет легко и понятно интерпретировать результаты и принять соответствующие решения по защите уязвимых участков.

Недостатки:

1. Трудоемкость: Применение метода Electre I может потребовать значительных вычислительных ресурсов и времени для анализа множества данных и принятия решений [5-7].

2. Субъективность: В процессе применения метода ELECTRE I требуется задание и взвешивание критериев, что может быть субъективным и зависеть от предпочтений экспертов или оценщиков [14-18].

В целом, применение метода ELECTRE I в модели определения уязвимости участков облачных вычислений может быть полезным и эффективным, но требует осторожного подхода и учета ограничений данного метода.

Целью данной работы является разработка алгоритма на основе метода ELECTRE I для определения степени уязвимости участков облачных вычислений.

Новизна работы заключается в том, что предложенный алгоритм учитывает специфику облачных сервисов и позволяет оценить уязвимость конкретных участков таких сервисов. В отличие от существующих методов, которые могут быть применимы только для оценки уязвимостей всей системы в целом, новый алгоритм позволяет проводить оценку уязвимостей на уровне отдельных участков, что делает его более точным и эффективным.

Метод ELectre I является одним из методов множественных критериев принятия решений. Он основан на разработке ранжирования и классификации объектов с использованием нескольких критериев или факторов. В данном случае, ELectre I используется для оценки и ранжирования уровня уязвимости участков облачных вычислений.

Существующие исследования в области безопасности и уязвимостей облачных вычислений обычно фокусируются на использовании других методов, таких как анализ рисков или статистические модели. Поэтому применение метода ELectre I для определения уязвимости участков облачных вычислений представляет новый исследовательский подход. Значимость работы заключается в нескольких аспектах:

1. Улучшение безопасности облачных вычислений: Работа вносит вклад в область безопасности облачных вычислений, предлагая новый алгоритм для определения степени уязвимости. Это может помочь организациям и провайдерам облачных услуг улучшить безопасность своих систем, идентифицировать уязвимости и принять соответствующие меры для их устранения.

2. Повышение эффективности оценки уязвимости: Использование метода ELectre I позволяет проводить более точную и систематическую оценку уязвимости участков облачных вычислений. Это предоставляет более объективные результаты и позволяет принимать информированные решения в отношении безопасности облачных окружений.

3. Возможность применения на практике: Работа имеет практическую значимость, так как предлагает инструмент для оценки безопасности облачных окружений, который может быть применен в реальных условиях. Это позволяет организациям и провайдерам облачных услуг принимать информированные решения по улучшению безопасности своих систем.

4. Возможность дальнейшего развития исследований: Работа предоставляет основу для дальнейших исследований и экспериментов в области безопасности облачных вычислений. Она стимулирует интерес к разработке и применению новых алгоритмов и методов для улучшения безопасности и защиты облачных окружений.

Поэтому данная работа имеет значимость как в научном, так и в практическом аспекте, предлагая новый подход к оценке уязвимости участков облачных вычислений и способствуя повышению безопасности в данной области.

Методы исследования. Часто возникает ситуация, когда сравниваемые альтернативы по критериям имеют различные значения или оценки (баллы). У одной альтернативы по сравнению с другой может быть по одним критериям оценка выше, а по другим наоборот ниже. То есть можно увидеть, что никакая строка из такой таблицы (матрица оценок

альтернатив по критериям) не доминирует другую. Поэтому все варианты по отношению абсолютного доминирования будут несравнимы и образуют множество Парето [10-13].

Рассмотрим ситуацию, когда критерии имеют количественную оценку важности, а не просто упорядочены. Альтернативы при этом будут оцениваться по порядковой шкале (качественной). Такая задача хорошо представляется с использованием бинарных отношений и теории графов. Так для каждого критерия строится граф, который показывает отношение предпочтения по заданному критерию. Вершины такого графа будут соответствовать альтернативам, дуги направляются от лучшего к худшему варианту. Необходимо объединить все графы в один, учитывая веса выбранных критериев, и выделить там вершину или вершины, которые будут считаться предпочтительными.

Метод, который позволяет решить такие многоцелевые задачи с комбинацией разных шкал, это метод ELECTRE I. Он относится к человеко-машинным процедурам, т. е. ЛППР (лицо, принимающее решение) определяет параметры, а программа рассчитывает варианты и представляет результат в наглядном виде [19-21]. Его суть состоит в том, что для несравнимых вершин по абсолютному доминированию вводятся показатели для сравнения – индексы согласия и несогласия, которые более чувствительны и позволяют учитывать относительную важность критериев. Введенные индексы сопоставляют с заданными значениями порога, и далее строят отношение для относительного доминирования. Для более простого понимания данного метода можно представлять, что критерии – это есть эксперты, у каждого из которых есть свой вес, т. е. его авторитет. И есть те, мнение (оценка) которых относится к большинству, а есть те, которые не согласны [22].

Индексы согласия. Первый этап по методу ELECTRE I – вычислить матрицу индексов согласия. Для этого берутся пары альтернатив (a_i, a_k) и для каждой такой пары:

а) Определяется группа $C(i, k)$ индексов критериев j , которая обозначает, что в выбранной паре a_i поставили более высокие оценки, и она будет предпочтительнее (1).

$$C(i, k) = \{j \mid u_{ij} > u_{kj}\} \quad (1)$$

где u – это j -ый критерий между i и k альтернативами. j – полученные номера критериев.

После этого необходимо определить суммарный вес в этой группе (2).

$$c_{ik} = \sum_{j \in C(i, k)} w_j \quad (2)$$

где w – это значения весов по j -му критерию.

Аналогично определяется группы индексов $D(i, k)$, оценки в которой противоположны (3). А также третья группа, в которой альтернативы считаются равноценными по критериям (4). Веса в группах также суммируются.

$$D(i, k) = \{j \mid u_{ij} < u_{kj}\}, d_{ik} = \sum_{j \in D(i, k)} w_j \quad (3)$$

$$E(i, k) = \{j \mid u_{ij} = u_{kj}\}, e_{ik} = \sum_{j \in E(i, k)} w_j \quad (4)$$

б) Вычисляется индекс согласия s_{ik} , который показывает, насколько мнение относительно a_i будет превышать мнение относительно a_k . Согласно методике ELECTRE I данный индекс рассчитывается по формуле (5).

$$s_{ik} = \frac{c_{ik} + 0,5 e_{ik}}{\sum_{j=1}^n w_j} \quad (5)$$

На основе индексов согласия строится матрица $S = (s_{ik})_{m \times m}$, где m – это число альтернатив.

Индексы несогласия. На втором этапе рассчитываются индексы несогласия. Мнение большинства отражается в индексах согласия, но необходимо учитывать и мнение меньшинства, то есть те пары, в которых оценки по критериям превосходят у второго элемента. Для этого в методе ELECTRE I вводятся индексы несогласия, которые определяются следующим образом. Для каждой пары (a_i, a_k) :

а) для каждого j -го критерия из множества $D(i, k)$, то есть таких, у которых оценки $u_{ij} < u_{kj}$, определяем индекс несогласия в диапазоне $0 \leq r_{ik}^j \leq 1$. Чем больше будут различаться оценки по j -му критерию, тем больше будет индекс несогласия. Однако здесь присутствует логическая неточность: используя порядковую шкалу невозможно между оценками оценить различие, только можно сказать, какая из этих оценок будет больше.

Авторы метода предлагают определять в порядковой шкале j -го критерия меру различия Δ_{ik}^j между оценками u_{ij} и u_{kj} не их разностью $(u_{kj} - u_{ij})$, а нахождением числа разделяющих их значений, прибавляя 1-цу, т. е. соседние значения будут различаться на 1-цу. r_{ik}^j рассчитываем как меру различия, умножив ее на константу $h_j > 0$. Эта константа будет индивидуальна для каждого критерия.

б) рассчитываем общий индекс несогласия (6).

$$r_{jk} = \max_j r_{ik}^j \quad (6)$$

Веса критериев не учитываются. Из всех несогласных значений определяется самый упорный. После того, как все пары альтернатив будут рассмотрены, строим матрицу индексов несогласия $R = (r_{ik})_{m \times m}$.

Построение графа относительного доминирования. На третьем этапе по методу ELECTRE I строятся графы. Для того, чтобы построить итоговое отношение по доминированию устанавливаются пороги несравнимости. Это пороговые значения по согласию s^* и несогласию r^* . Далее каждый индекс s_{ik} и r_{ik} (элементы матрицы) сравнить с порогами. Альтернатива a_i будет доминировать над a_k , если большинство критериев с учетом их веса согласованы, при этом нет значений, которые резко против, т. е. $s_{ik} \geq s^*$, $r_{ik} \leq r^*$.

Отношение относительного доминирования отображаем графом, дуги в котором будут направлены в сторону доминируемых вершин. С помощью индексов согласия и несогласия удастся объединить несколько графов в один. В результате такого действия некоторые альтернативы, которые были несравнимы по отношению абсолютного доминирования, теперь связаны дугами.

Следует отметить, что важен правильный выбор порогов несравнимости s^* и r^* . Так как при неудачном выборе могут образовываться контуры (орциклы). В этом случае авторами предлагается считать одной общей вершиной все вершины из замкнутого контура, т. е. провести операцию по стягиванию контуров. После этого контуров у графа не будет, можно будет построить ядро по алгоритму [19].

Проведение анализа (построение ядра). После того как построен ориентированный граф без контуров относительного доминирования определяем, какие вершины графа можно убрать, а какие следует оставить для последующего анализа. По методу ELECTRE I предлагается находить ядро, что успешно применяется в случае транзитивных графов. Те есть оставлять те вершины, которые друг друга не доминируют, а которые в совокупности доминируют другие. Известно, что любой граф без контуров будет иметь ядро, причем единственное. Для построения ядра будем использовать следующий алгоритм:

1. Разбить на ярусы. Находим вершины, в которые не идет ни одна дуга, в том числе изолированные. Эти вершины будут относиться к 0-му ярусу. Далее мысленно вы-

черквиваем такие вершины со всеми дугами, которые идет к ним или от них. В том графе, который получится после вычеркивания, определяем новые вершины. Они будут относиться к 1 ярусу. Аналогично повторяем операции до тех пор, пока все вершины не будут распределены на ярусы. Так будет происходить нормальное завершение алгоритма. Однако может возникнуть такая аварийная ситуация, когда часть вершин останется необработанной, т.к. на определенном шаге не найдутся антитупики. Это будет говорить о том, что в графе имеются контуры.

2. Определение ядра. Все вершины, которые включены в 0-ой ярус, будут считаться ядром. Вершины, которые остались, будут рассматриваться в порядке увеличения ярусов. В ядро необходимо добавить вершины, не связанные дугами.

Значительные усилия были предприняты для решения проблемы оценки облачных сервисов. Для решения этой проблемы были разработаны различные методы оценки облачных услуг. Облачные услуги оцениваются по множеству критериев, что приводит к проблеме многокритериального принятия решений. Тем не менее, исследования, которые анализируют и обобщают нерешенные проблемы и недостатки текущих методов поддержки принятия решений ограничены. В существующих обзорных исследованиях [23] рассматриваются и исследуются только отдельные части облачных сервисов, а не полное решение. Облачные вычисления предоставляют полностью масштабируемую, доступную и гибкую вычислительную платформу для различных приложений. Из-за множества приложений, которые облачные вычисления нашли во многих жизненных функциях, пользователи и поставщики рассмотрели возможность обеспечения безопасности облачных коммуникаций. Из-за своей распределительной природы, динамического пространства и отсутствия прозрачности при выполнении облачных вычислений приходится сталкиваться со многими проблемами в обеспечении безопасности. Для улучшения безопасности управление доверием может сыграть очень важную роль. В [24] предлагается общая аналитическая методология, которая использует ряд критериев оценки для оценки текущих прототипов тестирования доверительного управления в промышленных облачных вычислениях и смежных областях. Результаты сравнения и оценки эффективности этой модели показывают ее способность управлять доверием и способность быстро адаптироваться к изменениям в поведении поставщиков услуг. Результаты моделирования и оценки этой статьи показывают, что предложенная модель обеспечивает более точную оценку надежности поставщиков облачных услуг, чем другие модели.

В [25] сравниваются два подхода поддержки принятия решений: ANP и ELECTRE III для оценки показателей кибербезопасности. Растущее число сервисов, которые могут удовлетворить функциональные требования пользователей, вдохновило многих исследователей на разработку некоторых подходов для ранжирования и выбора наилучших сервисов с учетом их качества обслуживания (QoS) и предпочтений пользователей. Учитывая различные критерии, которые следует учитывать в процессе выбора услуги, широко применяются методы принятия решений по множеству критериев, чтобы помочь лицу, принимающему решения, определить вес каждого фактора QoS и ранжировать услуги, предоставляемые различными поставщиками услуг. В [26] представлено обширное исследование современных схем выбора услуг на основе многокритериальной поддержки принятия решений.

Для решения проблемы выбора услуг было предложено несколько подходов, включая многокритериальный анализ решений. Он позволяет пользователю выбирать из множества доступных вариантов. В [27] анализируется применение методов для выбора услуг. Там представлена таксономия, полученная на основе обзора литературы, выделено несколько современных практических аспектов для реализации многокритериальных методов поддержки принятия решений при выборе услуг облачных вычислений. Вклад этого исследования состоит из четырех частей: сосредоточение внимания на современных методах, освещение сравнительного анализа и пригодности нескольких методов, пред-

ставление таксономии посредством обширного обзора литературы, анализ и обобщение выбора услуг облачных вычислений в различных сценариях. В [28] описан метод классификации рисков в области информационной безопасности. Используя набор примеров классификации, рассматривается многокритериальная модель помощи при принятии решений ELECTRE. Эта модель способна классифицировать организации по классам риска на основе характеристики компании и результаты технической оценки. Модель заключалась в сборе примеров классификации, определении критериев измерения. Полученная модель реализована как веб-приложение, которое позволяет экспертам по безопасности сделать более уверенные выводы об уровне риска своих клиентов. Приведем сравнительный анализ аналогичных методов поддержки принятия решений для возможного применения оценки (табл. 1). Помимо ELECTRE I рассмотрим метод общего характера, такой как анализ иерархий и более специфичный для данной предметной области, CVSS.

Таблица 1. Сравнительный анализ методов поддержки принятия решений
Table 1. Comparative analysis of decision support methods

Название метода Method name	Суть метода Essence	Преимущества Advantages	Недостатки Flaws
МАИ - метод анализа иерархий. Analytical hierarchy process method	Используется для анализа сложных проблем и принятия решений на основе иерархической структуры/for analyzing complex problems and making decisions	Позволяет оценивать относительную важность элементов в системе, учитывать иерархическую структуру системы/evaluates the relative importance of elements in a system	Не учитывает вероятность возникновения угроз безопасности, не позволяет оценивать риски на уровне отдельных участков облачных сервисов/ does not take into account the likelihood of security threats
ELECTRE I	Используется для оценки и выбора предпочтительных вариантов действий на основе анализа их относительной важности/ to evaluate and select preferred options	Позволяет оценивать относительную важность элементов в системе, учитывать вероятность возникновения угроз безопасности, оценивать риски на уровне отдельных участков облачных сервисов/ evaluates the relative importance of elements in the system, takes into account the likelihood of security threats	Не учитывает уровень воздействия угроз и уровень потери в случае реализации угрозы/ does not take into account the level of impact of threats and the level of loss in the event of a threat being realized
CVSS (общая система оценки уязвимостей) Common vulnerability assessment system	Используется для оценки уязвимостей информационных систем и определения приоритетов в их устранении/ to assess the vulnerabilities of information systems and determine priorities	Учитывает уровень воздействия угроз и уровень потери в случае реализации угрозы/ Takes into account the level of impact of threats and the level of loss in the event of a threat being realized	Не позволяет оценивать относительную важность элементов в системе, не учитывает вероятность возникновения угроз безопасности/ does not allow to assess the relative importance of elements in the system, does not take into account the likelihood of security threats

Таким образом, каждый из методов имеет свои преимущества и недостатки, и выбор конкретного метода зависит от целей и требований оценки рисков облачных сервисов.

Выбор метода ELECTRE I для оценки уязвимостей участков облачных вычислений обусловлен несколькими причинами:

1. Учет экспертных знаний: ELECTRE I позволяет учитывать экспертные знания и предпочтения лица, принимающего решение. Это особенно важно при оценке уязвимостей, так как требуется учитывать специфику конкретной облачной инфраструктуры и ее компонентов.

2. Оценка важности уязвимостей: ELECTRE I позволяет сравнивать различные уязвимости и оценивать их важность. Это помогает определить приоритеты в устранении

уязвимостей и сосредоточить усилия на наиболее критических участках облачных вычислений.

3. Учет вероятности возникновения: Electre I учитывает вероятность возникновения уязвимостей, что позволяет оценить реальные риски и принять меры по их снижению.

4. Гибкость и настраиваемость: ELECTRE I позволяет настраивать критерии оценки в соответствии с конкретными потребностями и требованиями организации. Это дает возможность адаптировать метод под конкретную облачную инфраструктуру и ее особенности.

В целом, выбор метода ELECTRE I для оценки уязвимостей участков облачных вычислений обоснован его способностью учитывать экспертные знания, оценивать важность уязвимостей, учитывать вероятность возникновения и быть гибким в настройке критериев оценки. На основе использования метода ELECTRE I предлагается алгоритм по определению степени уязвимости участков облачных вычислений. На рис. 1 представлена модель (схема алгоритма) использования метода ELECTRE I для принятия решений.

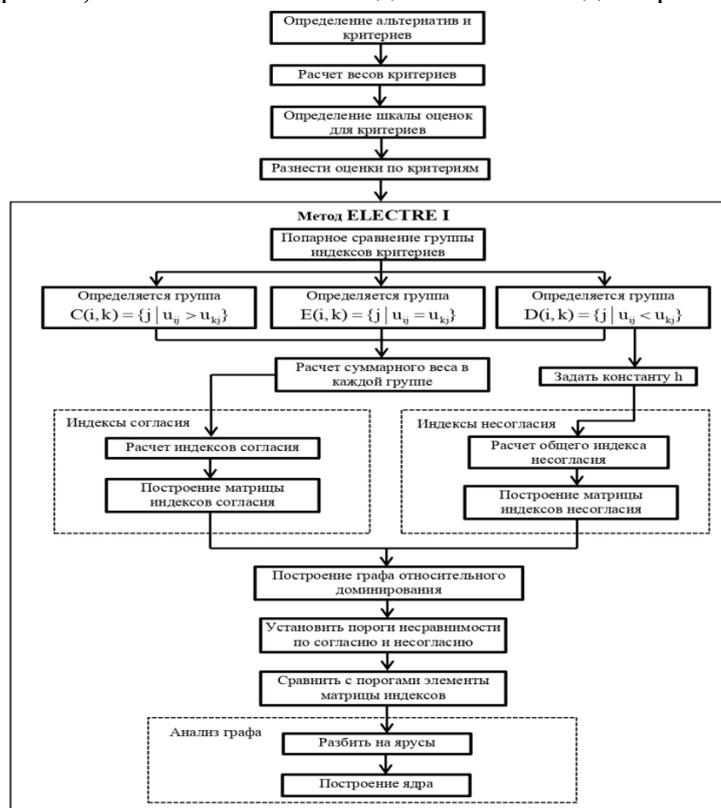


Рис. 1. Модель-алгоритм для определения степени уязвимости участков облачных вычислений на основе метода ELECTRE I

Fig. 1. Model-algorithm for determining the degree of vulnerability of cloud computing areas based on the ELECTRE I method

Данная модель позволит определить участок или участки, которые наиболее подвержены опасности поломки или выхода из строя, и удалить доминируемые альтернативы, которые не представляют серьезной опасности. На основе выявленных предпочтений можно принять решение об устранении неполадок по выбранным участкам облачного сервиса. Специфика применения метода ELECTRE I для определения степени уязвимости участков облачных вычислений имеет свои особенности. Вот некоторые из них:

1. Критерии уязвимости: Для применения метода ELECTRE I необходимо определить набор критериев, по которым будет проводиться оценка уязвимости. Эти критерии могут включать такие факторы, как уровень доступности, конфиденциальность данных, целостность и доступность резервной копии. Важно правильно выбрать и настроить эти критерии, чтобы они отражали особенности уязвимостей облачных вычислений.

2. Веса критериев: В методе ELECTRE I каждому критерию присваивается вес, который определяет его относительную важность при оценке уязвимости. Эти веса могут зависеть от конкретных потребностей и требований организации или провайдера облачных услуг. Важно тщательно определить веса критериев, чтобы они отражали их относительную значимость.

3. Интервальная шкала: Метод ELECTRE I использует интервальную шкалу для оценки каждого критерия по каждому участку облачных вычислений. Определение правильных интервалов и шкалы может быть сложной задачей, требующей тщательного анализа и экспертного мнения. Важно определить шкалу, которая наилучшим образом учитывает различные уровни уязвимости.

4. Пороговые значения: Для принятия решения о степени уязвимости каждого участка облачных вычислений необходимо определить пороговые значения. Эти значения помогут определить, когда участок считается уязвимым. Здесь важно учитывать специфические требования организации или провайдера услуг, а также уровень риска, который они готовы принять.

Обсуждение результатов. Применение метода ELECTRE I для определения степени уязвимости участков облачных вычислений требует тщательного анализа и настройки. Однако, он может предоставить более точные и объективные результаты, которые помогут организации и провайдерам услуг принимать информированные решения для улучшения безопасности облачных окружений.

Рассмотрим пример использования метода ELECTRE I для определения степени уязвимости в работе участков облачных сервисов. В качестве участков рассматривались следующие 7 блоков: серверы, виртуальные машины, хранилище, сети, ОС (операционная система), СУБД (система управления базами данных), связующее ПО (программное обеспечение). Эти участки различны по следующим критериям: администрирование и поддержка пользователей, производительность, надежность, масштабирование. Веса критериев найдем экспертным путем при помощи матрицы попарных сравнений.

Самым важным критерием при выборе участка оказалась надежность, менее значимым – масштабирование. Веса критериев соответственно равны: $w = (0.24, 0.3, 0.37, 0.09)$. Оценка по критериям будет производиться по качественной шкале (табл. 2). Для этой шкалы градации закодированы цифрами, т. е. если оценка для участка «4», это не значит что она в 2 раза лучше той, у которой значение «2».

Таблица 2. Шкала критериев для задачи выбора участка уязвимости облачных сервисов
Table 2. Criteria scale for the task of selecting a vulnerability area for cloud services

Критерии Criteria	Градации Grading	Балл (оценка) Score (rating)
U_1 – администрирование и поддержка пользователей/ administration and user support	отличная	5
	выше среднего	4
	средняя	3
	ниже среднего	2
	плохая	1
U_2 – производительность/ performance	отличная	3
	средняя	2
	плохая	1
U_3 – надежность/ reliability	высокая	2
	средняя	1
U_4 – масштабирование/ scaling	есть	1
	нет	0

Сравним 7 участков a_1, \dots, a_7 , их оценки u_{ij} по всем критериям представлены в табл. 3. Можно увидеть, что ни одна строка из этой таблицы не доминирует над другой, поэтому все варианты по отношению абсолютного доминирования несравнимы и образуют множество Парето.

Таблица 3. Оценки альтернатив по критериям
Table 3. Evaluation of alternatives by criteria

Альтернативы Alternatives a_i	u_{i1}	u_{i2}	u_{i3}	u_{i4}
a_1	4	3	2	1
a_2	4	3	1	1
a_3	3	2	2	1
a_4	5	2	2	0
a_5	2	2	1	1
a_6	5	3	2	1
a_7	3	3	2	0

Проиллюстрируем графы предпочтений для каждого критерия (рис. 2). Внизу указаны веса для соответствующих критериев.

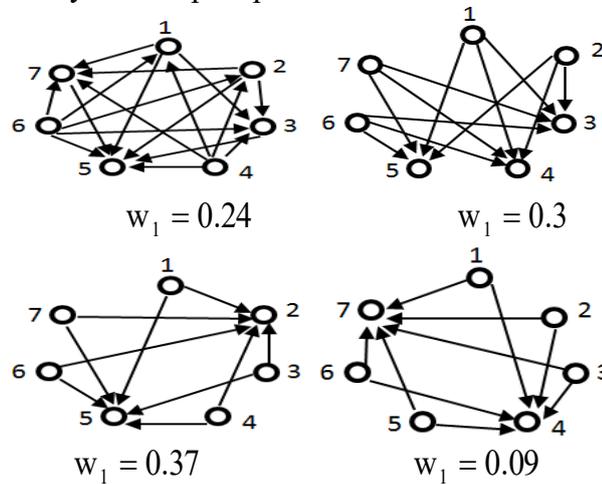


Рис. 2. Графы предпочтений по критериям
Fig. 2. Graphs of preferences by criteria

Далее по алгоритму метода ELECTRE I выполним попарное сравнение группы индексов критериев. Возьмем сначала пару (a_1, a_3) . Для нее первая альтернатива лучше второй по 1-му критерию и по 2-му, а по 3-му и 4-му равноценна. Таким образом, используя формулы 1-4, вычислим значения:

$$C(1, 3) = \{1, 2\}, D(1, 3) = \{0\}, E(1, 3) = \{3, 4\}$$

$$c_{1,3} = 0.24 + 0.3 = 0.54, d_{1,3} = 0, e_{1,3} = 0.37 + 0.09 = 0.46$$

Подставив в формулу (5), найдем индекс согласия, с учетом того, что $\sum w_j = 1$.

$$s_{1,3} = 0.54 + 0.5 \cdot 0.46 = 0.77$$

Аналогично вычислим остальные индексы. В результате получим матрицу индексов согласия S (рис. 3).

—	0,69	0,77	0,58	0,96	0,38	0,67
0,32	—	0,59	0,39	0,77	0,20	0,48
0,23	0,42	—	0,43	0,81	0,23	0,40
0,43	0,61	0,58	—	0,76	0,31	0,47
0,04	0,23	0,20	0,24	—	0,05	0,09
0,62	0,81	0,77	0,70	0,96	—	0,67
0,34	0,52	0,61	0,53	0,91	0,34	—

Рис. 3. Матрица индексов согласия
Fig. 3. Matrix of agreement indices

Теперь рассчитаем индексы несогласия. Для начала зададим значения константы, которые будут указывать на протест. Например, $h_1 = 0.2$, $h_2 = 0.25$, $h_3 = 0.25$, $h_4 = 0.15$. Это будет указывать на то, что при ситуации отдать предпочтение альтернативе, если она проигрывает по критерию «администрирование и поддержка пользователей» на 1-но деление шкалы, то вызывается протест 1-го критерия с интенсивностью 0.2.

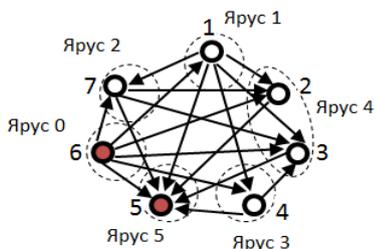
Для примера рассмотрим расчет $r_{2,6}$. Для пары альтернатив (a_2, a_6) несогласных с преимуществом a_2 показывает $D(2, 6) = \{1, 3\}$. Различие по 1-му критерию Δ_{26}^1 составляет 1-ну ступень, по 3-му Δ_{26}^3 – также. Следовательно, индексы несогласия равны: $r_{26}^1 = 1 \cdot 0.2$, $r_{26}^3 = 1 \cdot 0.2$. Отсюда общий индекс: $r_{26} = \max(0.2, 0.2) = 0.2$. Аналогично находятся остальные индексы. Итоговая матрица индексов несогласия R (рис. 4). Расчет по алгоритму метода ELECTRE I был реализован в Excel и в дальнейшем будет написана программа.

—	0,00	0,00	0,20	0,00	0,20	0,00
0,25	—	0,25	0,25	0,00	0,25	0,25
0,25	0,25	—	0,40	0,00	0,40	0,25
0,25	0,25	0,15	—	0,15	0,25	0,25
0,40	0,40	0,25	0,60	—	0,60	0,25
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	—	0,00
0,20	0,20	0,15	0,40	0,15	0,40	—

Рис. 4. Матрица индексов несогласия

Fig. 4. Matrix of disagreement indices

На 3-ем этапе строим граф относительного доминирования. Для этого возьмем значения порога по согласию $s^* = 0.5$ и по несогласию $r^* = 0.2$. Выполним перебор элементов в матрицах согласия и несогласия. Например, пара (a_1, a_2) войдет в отношение относительного доминирования, т. к. $s_{1,2} = 0.69 > 0.5$, $r_{1,2} = 0.0 \leq 0.2$; а пара (a_1, a_6) не войдет, т. к. $s_{1,6} = 0.38 < 0.5$, $r_{1,6} = 0.2 \leq 0.2$ и т. д. При данных значениях порогов несравнимости получим граф отношения (рис. 5).



при $s^* = 0.5$, $r^* = 0.2$

Рис. 5. Граф относительного доминирования при заданных порогах несравнимости

Fig. 5. Relative dominance graph for given incomparability thresholds

Построенное отношение обладает транзитивностью, т. е. участок a_1 предпочтительнее a_2 , a_2 будет предпочтительнее a_5 , и в графе имеется дуга (a_1, a_5) .

Согласно этапам алгоритма, выполним разбиение на ярусы, как показано на рис. 5. Ядро образует вершина 6 (ярус 0), которая выделена на рисунке заливкой. В результате количество несравнимых величин уменьшилось с 7-ми до ой-х, т. е. она доминирует все остальные вершины. Для уменьшения количества несравнимых вершин можно менять пороги несравнимости. Допустим, увеличивать порог по несогласию r^* , тогда появятся новые дуги в графе, а в ядро войдет меньше вершин. Добавить дуги можно и уменьшением порога по согласию s^* , но нужно быть осторожным в обоих случаях, так как могут возникнуть замкнутые контуры. В нашем примере этого делать нет необходимости, так как отсутствуют контуры. Поэтому к выбору порогов несравнимости следует подходить

ответственно, чтобы получить оптимальный вариант. Таким образом, для нашего примера вершины 5, а это ОС, один участок, на который следует, прежде всего, обратить внимание, т. к. именно он имеют наибольшую степень уязвимости.

Вывод. Облачные вычисления являются ключевой технологией в современных информационных системах, но они также могут стать объектом атак и уязвимостей. Метод ELECTRE I, который является одним из методов многокритериального анализа, был успешно применен в модели определения уязвимости участков облачных вычислений. Метод ELECTRE I позволил учитывать различные критерии при оценке и сравнении альтернатив.

На основе этого метода был предложен алгоритм для определения степени уязвимости участков облачных вычислений. Данная модель-алгоритм позволит определить участок или участки, которые наиболее подвержены опасности поломки или выхода из строя, и удалить доминируемые альтернативы, которые не представляют серьезной опасности. На основе выявленных предпочтений можно принять решение об устранении неполадок по выбранным участкам облачного сервиса.

Также в статье приводится пример использования предложенного алгоритма для определения степени уязвимости в работе участков 7 блоков облачных сервисов. Были выявлены 2 блока, на которые нужно обратить особое внимание, так как они имеют наибольшую степень уязвимости.

Библиографический список:

1. A cloud server energy consumption measurement system for heterogeneous cloud environments / W. Lin, H. Wang, Y. Zhang, D. Qi, J.Z. Wang, V. Chang // *Information Sciences*. – Vol. 468. – November 2018. – P. 47–62. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2018.08.032>.
2. Paul PK; Ghose MK (2012). Cloud Computing: possibilities, challenges and opportunities with special reference to its emerging need in the academic and working area of Information Science. *International conference on modelling optimization and computing*, 38, 2222-2227. DOI:10.1016/j.proeng.2012.06.267.
3. Reynolds, P; Yetton, P. (2015). Aligning business and IT strategies in multi-business organization. *Journal of information technology*, 30 (2), 101-118. <https://doi.org/10.1057/jit.2015.1>.
4. Lin W, Wang H., Zhang Y., Qi D., Wang J.Z., Chang V. A cloud server energy consumption measurement system for heterogeneous cloud environments. *Information Sciences*, 2018, vol. 468, pp. 47–62. DOI:10.1016/j.ins.2018.08.032.
5. Jones, S (2015). Cloud computing procurement and implementation: Lessons learnt from a United Kingdom case study. *International journal of information management*, 35 (6), 712-716. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2015.07.007>.
6. Amir Mohamed Elamir, Norleyza Jailani, Marini Abu Dakar. (2013). Framework and architecture for programming education environment as cloud computing service. *Procedia Technology*, 11, 1299-1308. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2013.12.328>.
7. Sultan, N. (2013). Knowledge management in the age of cloud computing and Web 2.0: Experiencing the power of disruptive innovations. *International journal of information management*, 33 (1), 160-165. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2012.08.006>.
8. Breedveld S., Craft D., van Haveren R., Heijmen B. (2019). Multi-criteria optimization and decision-making in radiotherapy // *European Journal of Operational Research*, 277(1), c. 1-19. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.08.019>.
9. Singh, B.K., Roy, H., Mondal, B., Roy, S.S., Mandal, N. (2019). Measurement of chip morphology and multi criteria optimization of turning parameters for machining of AISI 4340 steel using Y-ZTA cutting insert // *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 142, c. 181-194. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.04.064>.
10. Wang J.-Q., Li S., Hedayati Dezfuli F., Alam M.S. (2019). Sensitivity analysis and multi-criteria optimization of SMA cable restrainers for longitudinal seismic protection of isolated simply supported highway bridges // *Engineering Structures*, 189, c. 509-522. DOI:10.1016/j.engstruct.2019.03.091.
11. Álvarez-Miranda E., Garcia-Gonzalo J., Pais C., Weintraub A. (2019). A multicriteria stochastic optimization framework for sustainable forest decision making under uncertainty // *Forest Policy and Economics*, 103, c. 112-122. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2018.03.006>.
12. Breedveld S., Craft D., van Haveren R., Heijmen B. (2019). Multi-criteria optimization and decision-making in radiotherapy // *European Journal of Operational Research*, 277(1), c. 1-19. DOI: 10.1016/j.ejor.2018.08.019.
13. Razumnikov S.V. (2022). Building an Aggregate Rating of Popular SaaS Services Based on Organization of Customer Support Channels // *Lecture Notes in Electrical Engineering*, vol. 857 LNEE, – p. 313-323. https://doi.org/10.1007/978-3-030-94202-1_30.
14. Разумников С.В. Некомпенсаторное агрегирование и рейтингование провайдеров облачных услуг // *Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники*. 2018. Т. 21. № 4. С. 63-69. doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-4-63-69.

15. Разумников С.В. Планирование развития облачной стратегии на основе применения многокритериальной оптимизации и метода STEM//Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2020. Т. 23. № 1. С. 53-61. DOI: 10.21293/1818-0442-2020-23-1-53-61.
16. Разумников С.В. Модели, алгоритмы и программное обеспечение поддержки принятия стратегических решений к переходу на облачные технологии: монография / С.В. Разумников // Изд-во Томского политехнического университета. - 2020. - 176 с.
17. Разумников С.В. Разработка программного обеспечения для построения агрегированных рейтингов на основе метода порогового агрегирования // Вестник воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. 2021. № 2. с. 138-152. DOI: <https://doi.org/10.17308/sait.2021.2/3510>.
18. Micale R., La Fata C.M., La Scalia G. (2019). A combined interval-valued ELECTRE TRI and TOPSIS approach for solving the storage location assignment problem // Computers and Industrial Engineering, 135, с. 199-210. DOI:10.1016/j.cie.2019.06.011.
19. Zhou H., Wang J.-Q., Zhang H.-Y. (2019). Stochastic multicriteria decision-making approach based on SMAA-ELECTRE with extended gray numbers // International Transactions in Operational Research, 26(5), с. 2032-2052. DOI:10.1111/itor.12380.
20. Liao H., Jiang L., Lev B., Fujita H. (2019). Novel operations of PLTSs based on the disparity degrees of linguistic terms and their use in designing the probabilistic linguistic ELECTRE III method // Applied Soft Computing Journal, 80, с. 450-464. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2019.04.018>.
21. Costa A.S., Rui Figueira J., Vieira C.R., Vieira I.V. (2019). An application of the ELECTRE TRI-C method to characterize government performance in OECD countries // International Transactions in Operational Research, 26(5), с. 1935-1955. DOI:10.1111/itor.12394.
22. Akram M., Waseem N., Liu P. (2019). Novel Approach in Decision Making with m-Polar Fuzzy ELECTRE-I // International Journal of Fuzzy Systems, 21(4), с. 1117-1129. DOI:10.1007/s40815-019-00608-y.
23. Hamzeh Alabool, Ahmad Kamil, Noreen Arshad, Deemah Alarabiat, Cloud service evaluation method-based Multi-Criteria Decision-Making: A systematic literature review, Journal of Systems and Software, Volume 139, 2018, Pages 161-188. <https://doi.org/10.1016/j.jss.2018.01.038>.
24. Khoruzhy, L.I., Petrovich Bulyga, R., Yuryevna Voronkova, O., Vasyutkina, L.V., Ryafikovna Saenko, N., Leonidovich Poltarykhin, A. and Aravindhan, S. (2022), "A new trust management framework based on the experience of users in industrial cloud computing using multi-criteria decision making", *Kybernetes*, Vol. 51 No. 6, pp. 1949-1966. <https://doi.org/10.1108/K-05-2021-0378>.
25. Bhol, S.G., Mohanty, J.R., Pattnaik, P.K. (2020). Cyber Security Metrics Evaluation Using Multi-criteria Decision-Making Approach. In: Satapathy, S., Bhateja, V., Mohanty, J., Udgata, S. (eds) Smart Intelligent Computing and Applications. Smart Innovation, Systems and Technologies, vol 160. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-32-9690-9_71.
26. Hosseinzadeh, M., Hama, H.K., Ghafour, M.Y. et al. Service Selection Using Multi-criteria Decision Making: A Comprehensive Overview. *J Netw Syst Manage* 28, 1639–1693 (2020). <https://doi.org/10.1007/s10922-020-09553-w>.
27. Md Whaiduzzaman, Abdullah Gani, Nor Badrul Anuar, Muhammad Shiraz, Mohammad Nazmul Haque, Israat Tanzeena Haque, "Cloud Service Selection Using Multicriteria Decision Analysis", *The Scientific World Journal*, vol. 2014, Article ID 459375, 10 pages, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/459375>.
28. van der Meer J. et al. Multi-criteria decision model inference and application in information security risk classification : дис. – Ph. D. dissertation, Master Thesis, Dept. Economics, Erasmus University Rotterdam, 2012.

References:

1. A cloud server energy consumption measurement system for heterogeneous cloud environments. W. Lin, H. Wang, Y. Zhang, D. Qi, J.Z. Wang, V. Chang *Information Sciences*. November 2018; 468:47–62. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2018.08.032>.
2. Paul PK; Ghose MK (2012). Cloud Computing: possibilities, challenges and opportunities with special reference to its emerging needs in the academic and working area of Information Science. International conference on modeling optimization and computing, 38, 2222-2227. DOI:10.1016/j.proeng.2012.06.267.
3. Reynolds, P; Yetton, P. Aligning business and IT strategies in multi-business organization. *Journal of information technology*, 2015;30(2), 101-118. <https://doi.org/10.1057/jit.2015.1>.
4. Lin W, Wang H., Zhang Y., Qi D., Wang J.Z., Chang V. A cloud server energy consumption measurement system for heterogeneous cloud environments. *Information Sciences*, 2018; 468:47–62. DOI:10.1016/j.ins.2018.08.032.
5. Jones, S. Cloud computing procurement and implementation: Lessons learned from a United Kingdom case study. *International journal of information management*. 2015;35 (6):712-716. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2015.07.007>.
6. Amir Mohamed Elamir, Norleyza Jailani, Marini Abu Bakar. Framework and architecture for programming education environment as cloud computing service. *Procedia Technology*. 2013;11:1299-1308. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2013.12.328>.
7. Sultan, N. Knowledge management in the age of cloud computing and Web 2.0: Experiencing the power of disruptive innovations. *International journal of information management*. 2013;33(1):160-165. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2012.08.006>.
8. Breedveld S., Craft D., van Haveren R., Heijmen B. Multi-criteria optimization and decision-making in radiotherapy. *European Journal of Operational Research*, 2019;277(1):1-19. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.08.019>.
9. Singh, B. K., Roy, H., Mondal, B., Roy, S. S., Mandal, N. Measurement of chip morphology and multi criteria optimization of turning parameters for machining of AISI 4340 steel using Y-ZTA cutting insert. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 2019;142:181-194. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.04.064>.

10. Wang J.-Q., Li S., Hedayati Dezfuli F., Alam M.S. Sensitivity analysis and multi-criteria optimization of SMA cable restrainers for longitudinal seismic protection of simply isolated supported highway bridges. *Engineering Structures*, 2019;189: 509-522. DOI:10.1016/j.engstruct.2019.03.091.
11. Álvarez-Miranda E., Garcia-Gonzalo J., Pais C., Weintraub A. A multicriteria stochastic optimization framework for sustainable forest decision making under uncertainty. *Forest Policy and Economics*, 2019;103:112-122. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2018.03.006>.
12. Breedveld S., Craft D., van Haveren R., Heijmen B. Multi-criteria optimization and decision-making in radiotherapy // *European Journal of Operational Research*, 2019;277(1):1-19. DOI: 10.1016/j.ejor.2018.08.019.
13. Razumnikov S.V. Building an Aggregate Rating of Popular SaaS Services Based on Organization of Customer Support Channels. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 2022; 857 LNEE: 313-323. https://doi.org/10.1007/978-3-030-94202-1_30.
14. Razumnikov S.V. Non-compensatory aggregation and rating of cloud service providers. *Reports of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics*. 2018; 21(4): 63-69. doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-4-63-69 .
15. Razumnikov S.V. Planning the development of a cloud strategy based on the use of multicriteria optimization and the STEM method. *Reports of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics*. 2020; 23(1):53-61. DOI: 10.21293/1818-0442-2020-23-1-53-61.
16. Razumnikov S.V. Models, algorithms and software for supporting strategic decision-making for the transition to cloud technologies: monograph / S.V. Razumnikov. *Publishing house of Tomsk Polytechnic University*. 2020; 176
17. Razumnikov S.V. Development of software for constructing aggregated ratings based on the threshold aggregation method. *Bulletin of the Voronezh State University. Series: System Analysis and Information Technology*. 2021; 2: 138-152. DOI: <https://doi.org/10.17308/sait.2021.2/3510>.
18. Micale R., La Fata C.M., La Scalia G. A combined interval-valued ELECTRE TRI and TOPSIS approach for solving the storage location assignment problem. *Computers and Industrial Engineering*, 2019;135:199-210. DOI:10.1016/j.cie.2019.06.011.
19. Zhou H., Wang J.-Q., Zhang H.-Y. Stochastic multicriteria decision-making approach based on SMAA-ELECTRE with extended gray numbers. *International Transactions in Operational Research* 2019;26(5):2032-2052. DOI:10.1111/itor.12380.
20. Liao H., Jiang L., Lev B., Fujita H. Novel operations of PLTSs based on the disparity degrees of linguistic terms and their use in designing the probabilistic linguistic ELECTRE III method. *Applied Soft Computing Journal*, 2019;80: 450-464. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2019.04.018>.
21. Costa A.S., Rui Figueira J., Vieira C.R., Vieira I.V. An application of the ELECTRE TRI-C method to characterize government performance in OECD countries. *International Transactions in Operational Research*, 2019;26(5):1935-1955. DOI:10.1111/itor.12394.
22. Akram M., Waseem N., Liu P. Novel Approach in Decision Making with m-Polar Fuzzy ELECTRE-I. *International Journal of Fuzzy Systems*, 2019; 21(4): 1117-1129. DOI:10.1007/s40815-019-00608-y.
23. Hamzeh Alabool, Ahmad Kamil, Noreen Arshad, Deemah Alarabiat, Cloud service evaluation method-based Multi-Criteria Decision-Making: A systematic literature review, *Journal of Systems and Software*, Volume 139, 2018:161-188. <https://doi.org/10.1016/j.jss.2018.01.038>.
24. Khoruzhy, L.I., Petrovich Bulyga, R., Yuryevna Voronkova, O., Vasyutkina, L.V., Ryafikovna Saenko, N., Leonidovich Poltarykhin, A. and Aravindhyan, S. (2022), "A new trust management framework based on the experience of users in industrial cloud computing using multi-criteria decision making", *Kybernetes*, 1966;51(6):1949-<https://doi.org/10.1108/K-05-2021-0378>.
25. Bhol, S.G., Mohanty, J.R., Pattnaik, P.K. Cyber Security Metrics Evaluation Using Multi-criteria Decision-Making Approach. In: Satapathy, S., Bhateja, V., Mohanty, J., Udgata, S. (eds) *Smart Intelligent Computing and Applications . Smart Innovation, Systems and Technologies*, 2020;160. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-32-9690-9_71.
26. Hosseinzadeh, M., Hama, H.K., Ghafour, M.Y. *et al.* Service Selection Using Multi-criteria Decision Making: A Comprehensive Overview. *J Netw Syst Manage* 28, 2020;1639–1693. <https://doi.org/10.1007/s10922-020-09553-w>.
27. Md Whaiduzzaman, Abdullah Gani, Nor Badrul Anuar, Muhammad Shiraz, Mohammad Nazmul Haque, Israat Tanzeena Haque, "Cloud Service Selection Using Multicriteria Decision Analysis", *The Scientific World Journal*, vol. 2014; Article ID 459375, 10 pages, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/459375>.
28. van der Meer J. *et al.* Multi-criteria decision model inference and application in information security risk classification : дис. – Ph. D. dissertation, Master Thesis, Dept. Economics, Erasmus University Rotterdam, 2012.

Сведения об авторе:

Разумников Сергей Викторович, кандидат технических наук, доцент, отделение цифровых технологий и безопасности; demolove7@inbox.ru; ORCID:0000-0002-1417-498X

Information about author:

Sergey V. Razumnikov, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Department of Digital Technologies and Security; demolove7@inbox.ru; ORCID:0000-0002-1417-498X

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/ Received 07.06.2024.

Одобрена после рецензирования / Revised 20.07.2024.

Принята в печать / Accepted for publication 30.10.2024.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 519.681



DOI: 10.21822/2073-6185-2024-51-4-144-153

Оригинальная статья /Original article

**Методические аспекты формирования оценочных материалов при подготовке
IT-специалистов в области программирования
Е.В. Савина¹, К.Я. Раджабов¹, Т.И. Исабекова²**

¹Дагестанский государственный университет народного хозяйства,

¹367008, г. Махачкала, ул. Джамалутдина Атаева, 5, Россия,

²Дагестанский государственный технический университет,

²367015, г. Махачкала, просп. Имама Шамиля, д. 70, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является обоснование целесообразности применения разработанной методики формирования оценочных материалов при подготовке IT - специалистов в области программирования с последующим использованием ее в рамках технологий традиционного и дистанционного обучения в системе высшего образования. **Метод.** К методам научного исследования относятся: анализ оценочных материалов; методы, основанные на алгоритмах декомпозиции предлагаемого для решения задачи программного кода; методы анализа данных из открытых источников, методы анализа алгоритмов и структур данных. Применен компетентностный подход, как альтернатива классическому подходу, в котором используются, главным образом, категории усвоения знаний. **Результат.** Обоснована возможность применения при изучении языков программирования тестовых заданий как традиционных, а также заданий в виде кейсов. Предложен апробированный подход к дифференциации кейсовых заданий по программированию по уровню сложности, предусматривающий градацию по трем уровням. **Вывод.** Апробация заданий, разработанных в рамках предлагаемой методики, показала ее эффективность как в процессе обучения, так и при оценке уровня подготовленности обучающихся в области программирования. Применение данного подхода эффективно как в традиционном, так и в дистанционном обучении.

Ключевые слова: программирование; компетенции; оценочные материалы; методика, тесты, кейсы

Для цитирования: Е.В. Савина, К.Я. Раджабов, Т.И. Исабекова. Методические аспекты формирования оценочных материалов при подготовке IT-специалистов в области программирования. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2024; 51(4):144-153. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-4-144-153

Adaptation of the competence approach to the methodology of training it specialists in the field of programming

E.V. Savina¹, K.Ya. Radjabov¹, T.I. Isabekova²

¹Dagestan State University of National Economy,

5 Jamalutdin Ataev St., Makhachkala 367008, Russia,

²Daghestan State Technical University,

70 I. Shamil Ave., Makhachkala 367015, Russia

Abstract. Objective. Substantiation of the expediency of using the proposed methodology for the formation of evaluation materials in the training of IT specialists in the field of programming, followed by its use within the framework of traditional and distance learning technologies in the higher education system. **Method.** The research methods include: analysis of evaluation materials; methods based on algorithms for decomposing the program code proposed for solving the problem; methods for analyzing data from open sources, methods for analyzing

algorithms and data structures. A competency-based approach is used as an alternative to the classical approach, which uses categories of knowledge acquisition. **Result.** The possibility of using test tasks as traditional ones, as well as tasks in the form of cases, is substantiated. A proven approach to differentiating case programming tasks by level of complexity is proposed, which provides for gradation into three levels. **Conclusion.** Testing of the methodology has shown its effectiveness in assessing the level of preparedness of students in the field of programming, both in traditional and distance learning.

Keywords: programming; competencies; assessment materials; methodology, tests, cases

For citation: E.V. Savina, K.Ya. Radjabov, T.I. Isabekova. Methodological aspects of the formation of evaluation materials in the training of IT specialists in the field of programming. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2024; 51(4):144-153. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-4-144-153

Введение. Современный этап развития страны характеризуется широким проникновением цифровых технологий во все сферы деятельности, включая систему образования. В условиях проводимой в стране цифровизации экономики остро стоит проблема подготовки высококвалифицированных ИТ-специалистов, владеющих умениями и навыками разработки, внедрения и сопровождения программного обеспечения. Многие образовательные программы, связанные с ИТ-сферой, содержат спектр учебных дисциплин, ориентированных на получение профессиональных компетенций, которые востребованы в условиях цифровой трансформации практико-ориентированных бизнес-процессов.

Существует достаточно большое количество публикаций, в которых с различной степенью глубины обсуждаются содержательные и методические аспекты обучения программированию, но при этом связь программирования с другими дисциплинами профильной подготовки практически не рассматривается, зачастую остаются без внимания и вопросы формирования профессиональных компетенций у специалистов ИТ-направления в процессе обучения технологиям и методам программирования. При многообразии дисциплин, обеспечивающих профессиональную подготовку в области информационных технологий, практически отсутствуют подходы к выявлению вклада каждой из дисциплин в формирование конкретных профессиональных компетенций выпускника. Это обусловлено необходимостью формирования эффективных подходов в оценке приобретаемых компетенций, которые должны принципиально отличаться от традиционного подхода, направленного на выявление объема и качества усвоенных знаний. Компетентностный подход предполагает, в первую очередь, оценку способностей к профессиональной деятельности, освоенных в процессе обучения.

Постановка задачи. Письмом Минобрнауки РФ руководителям образовательных организаций высшего образования от 12.07.2021 № мн-5/4611 было рекомендовано включить в образовательные программы модули «Введение в информационные технологии» и «Информационные технологии и программирование», направленные на формирование компетенций, включающих способности понимать принципы работы современных ИТ-технологий, использовать их для решения задач профессиональной деятельности и разрабатывать алгоритмы и компьютерные программы. В соответствии с этим возникла необходимость серьезной переработки имеющихся оценочных материалов в вузах региона в связи с появлением большого числа новых учебных ИТ-дисциплин. При этом актуально как увеличение их количества с учетом необходимости случайного формирования тестовых комплектов, так и качественное совершенствование их содержания.

Методы исследования. В ходе практической реализации компетентностного подхода в подготовке бакалавров для ИТ-отрасли в вузах Республики Дагестан для ряда образовательных программ был сформирован интегрированный бизнес-процесс, включающий в технологическом плане ряд взаимосвязанных учебных дисциплин, приведенных на рис. 1 (на примере направления подготовки 09.03.03 Прикладная информатика).

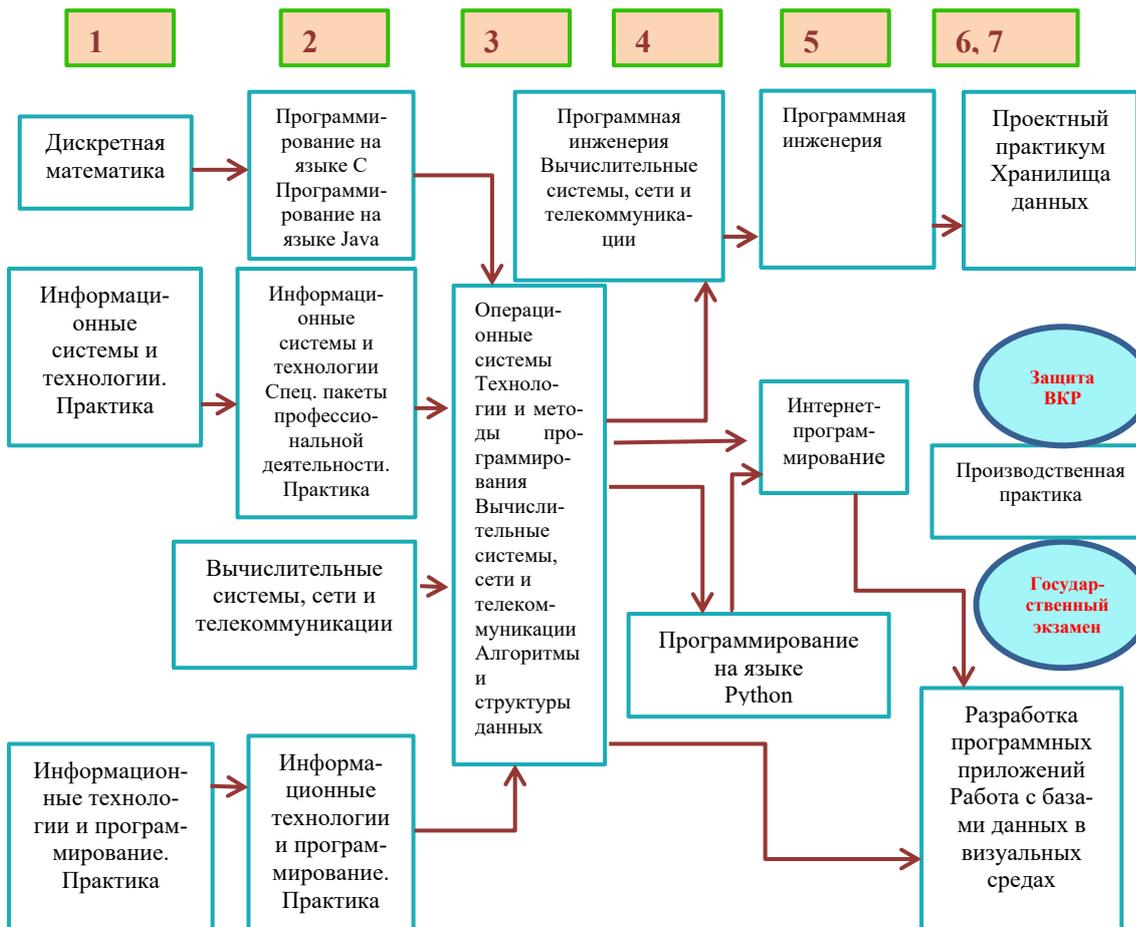


Рис. 1. Структура интегрированного бизнес-процесса
 Fig. 1. The structure of the integrated business process

Бизнес-процесс предусматривает развитие у бакалавров следующих компетенций:

- ОПК1 – способность применять естественнонаучные и общетеоретические знания, методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования в профессиональной деятельности;
- ОПК2 – способность понимать принципы работы современных информационных технологий и программных средств, в том числе отечественного производства, и использовать их при решении задач профессиональной деятельности;
- ОПК7 – способность разрабатывать алгоритмы и программы, пригодные для практического применения;
- ОПК4 – способность участвовать в разработке стандартов, норм и правил, а также технической документации, связанной с профессиональной деятельностью;
- ПК1 – способность проводить обследование организаций, выявлять информационные потребности пользователей, формировать требования к информационной системе;
- ПК2 – способность разрабатывать, адаптировать, тестировать и внедрять прикладное программное обеспечение информационных систем;
- ПК3 – способность проектировать информационные системы по видам обеспечения.

Под компетентностным подходом будем понимать альтернативу классическому подходу, в котором используются, главным образом, категории усвоения знаний. При этом оценка компетенций, в отличие от экзаменационных испытаний, нацелена на практическое применение специальных подходов и методов диагностики деятельности. Термин «компетенция» будем трактовать как совокупность взаимосвязанных качеств лич-

ности (знаний, умений, трудовых навыков), задаваемых по отношению к определенному кругу дисциплин при формировании индикаторов достижения [1, 15].

Одним из показателей качества профессиональной подготовки программистов является профессиональная компетентность, которая определяется через умение специалиста применить полученные знания, умения и навыки для решения прикладных задач [5-8, 13]. При формировании профессиональных компетенций в области программирования важное место занимает профессиональная компетенция ПК2 [12]. В условиях цифровизации экономики особое внимание специалисты уделяют информационно-аналитическим компетенциям, связанным с системами искусственного интеллекта. Для комплексного решения проблемы подготовки программистов образовательные программы, реализуемые в регионе, дополнены учебными курсами по программированию в рамках сетевого взаимодействия с ведущими вузами Российской Федерации (НИУ ВШЭ, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого).

Обсуждение результатов. Традиционные формы тестовых заданий, особенно открытые и закрытые, которые чаще всего используются в тестировании, фактически не отражают реального уровня усвоения материала. Для более достоверной оценки усвоения компетенций (актуально для дистанционного обучения), интегрированных в обобщенный бизнес-процесс, нами разработаны и апробированы разнообразные многофункциональные оценочные материалы и кейсы, примерные варианты которых приведены ниже.

Пример 1. Изучите программный код и выполните задания.

```
begin
  var s: ...;
  for var i := 1 to 4 do
    for var j := 1 to 6 do
      begin
        read(s[i, j]);
        if s[i, j] = '+' then s[i, j] := '1';
      end;
    for var i := 1 to 4 do
      begin
        for var j := 1 to 6 do write(s[i, j]);
        println
      end;
    end.
```

1. Фрагмент программы выполняет следующие действия: считывает числовой массив 4×6 по столбцам; считывает символьный массив 4×6 по строкам; считывает символьный массив 6×4 по столбцам; считывает массив целых чисел 6×4 по строкам; заменяет все элементы 1-й строки на единицы; определяет количество знаков «плюс» и заменяет их на «1»; заменяет все знаки «плюс» на единицы; заменяет все единицы на знак «плюс»; выводит на экран полученный массив в строку; выводит на экран полученный массив в виде таблицы.

2. Определите тип переменной s .
3. Замените выражение логического типа логической переменной a . Как изменится код?
4. Что изменится, если процедуру `write` заменить на `print`?
5. Определите тип переменных i и j . Измените код так, чтобы переменные i и j получили тип `byte`.

Пример 2. Изучите программный код и выполните задания.

```
const n = 5;
begin
  var s: ...;
  for var i := 1 to n do readln(s[i]);
  var m := 0;
  var k := 1;
  repeat
    if s[k] in ['a'..'1'] then
      begin
        s[k] := '0';
```

```
inc(m);  
end;  
k += 1  
until k > n;  
println('m =', m);  
foreach var a in s do print(a)  
end.
```

1. Программный код выполняет следующие действия: считывает строку, определяет в ней количество m букв $a\dots l$, вставляет после каждой из них пробел и выводит на экран значение m и новую строку; считывает массив символов, определяет в нем количество m букв от a до l , выводит на экран значение m и элементы массива в столбец; считывает строку, определяет в ней количество букв $a\dots l$, удаляет эти буквы из строки и новую строку выводит на экран; считывает массив символов, определяет в нем количество m букв $a\dots l$, заменяет их нулями и выводит на экран значение m и элементы массива в строку; считывает строку, определяет в ней количество m букв $a\dots l$, заменяет их пробелами и выводит на экран значение m и новую строку.

2. Определите тип переменных s , k , m и a .

3. Выпишите строку, содержащую конструктор множества, и измените ее так, чтобы множество не использовалось

4. Замените оператор цикла с постусловием оператором цикла с предусловием

5. Замените оператор `foreach`: оператором `for`; оператором `repeat...until`.

6. Можно ли заменить оператор `foreach` оператором `loop`? Ответ обоснуйте.

Пример 3. Изучите программный код и выполните задания.

```
begin  
var s := Readln...;  
var k := 1;  
var t1 := '';  
var m := 0;  
repeat  
if (s[k] >= '0') and (s[k] <= '9') then  
begin  
inc(m);  
t1 += s[k];  
end;  
inc(k)  
until k > length(s);  
println(s);  
println('m =', m, t1)  
end.
```

1. Программный код выполняет следующие действия: ввод действительной переменной; ввод строки; вычисляет количество положительных элементов в массиве; определяет, содержит ли строка знаки препинания; определяет количество цифр в строке; выводит цифры на экран в виде целого числа; записывает цифры в новую строку; выводит на экран новую строку; выводит на экран количество цифр в строке; выводит на экран новый массив, составленный из цифр, содержащихся в строке.

2. Определите тип переменных s , $t1$, k , m . Может ли переменная m иметь тип `boolean`? тип `byte`?

3. Замените оператор цикла `repeat` оператором `while`.

4. Оформите условие, которое используется в первой строке оператора цикла, в виде отдельной функции.

5. Можно ли оператор `println(s)` оформить с помощью оператора цикла? Ответ обоснуйте.

6. Каким образом можно изменить код, чтобы постусловие имело вид `until k > N`?

Пример 4. Работа предназначена для выполнения без компьютера (среда Delphi/Lazarus)

Задание 1. По приведенному программному коду определить компонентный состав и функционал приложения.

Задание 2. К каждому оператору написать комментарий с объяснением действия этого оператора.

Листинг программы

unit pic02; interface uses

Windows, Messages, SysUtils, Variants, Classes, Graphics, Controls, Forms, Dialogs, StdCtrls, Buttons, ExtCtrls, ExtDlgs;

```
type
  TForm1 = class(TForm)
    dlgOpenPic1: TOpenPictureDialog;
    dlg1: TSavePictureDialog;
    img1: TImage;
    btn1: TBitBtn;
    btn2: TBitBtn;
  procedure btn1Click(Sender: TObject);
  procedure FormActivate(Sender: TObject);
  procedure btn2Click(Sender: TObject);
  private
    { Private declarations }
  public
    { Public declarations }
  end;
var
  Form1: TForm1;
implementation
  {$R *.dfm}
  procedure TForm1.btn1Click(Sender: TObject);
    var fName: string;
  begin
    if dlgOpenPic1.Execute then
      begin
        fName := dlgOpenPic1.FileName;
        img1.Picture.LoadFromFile(fName);
        btn2.Enabled := True;
      end;
  end;
  procedure TForm1.FormActivate(Sender: TObject);
  begin
    Form1.Color := clLime;
    btn2.Enabled := False;
    btn2.Caption := 'Сохранить'
  end;
  procedure TForm1.btn2Click(Sender: TObject);
    var fName: string;
  begin
    if dlg1.Execute then
      begin
        fName:= dlg1.FileName;
        img1.Picture.SaveToFile(FName);
      end;
  end;
end.
```

Задание 3. Описать вид окна при запуске приложения.

Задание 4. Измените код процедуры btn1Click так, чтобы рисунок загружался без использования компонента OpenDialog.

Задание 5. Описать процесс работы приложения и вид окна в конце его работы.

Кейс (от англ. case – случай, дело) – это описание конкретной ситуации или случая в какой-либо сфере: социальной, экономической, медицинской и т. д. Как правило, кейс содержит не просто описание, но и некую проблему или противоречие и строится на реальных фактах [2]. Соответственно, решить кейс – это значит проанализировать предложенную ситуацию и найти оптимальное решение. Активное использование кейс-технологии в образовании началось сравнительно недавно, и сейчас этот подход считается одной из наиболее эффективных технологий обучения.

Кейс-метод по сравнению с традиционными методами обучения имеет следующие три основных преимущества [2].

1. Практическая направленность. Метод позволяет применить теоретические знания к решению практических задач, что позволяет в значительной степени скомпенсировать исключительно академическое вузовское образование.
2. Интерактивный формат. «Погружение» в реальную ситуацию обеспечивает более эффективное усвоение материала. Главный акцент при использовании метода – не усвоение готового знания, а участие в процессе его создания.
3. Получение конкретных навыков, soft skills, которые при традиционных методах обучения у выпускника вуза практически отсутствуют, которые необходимы в реальной работе и на приобретение которых уходит достаточно много времени.

В настоящее время сосуществуют две классические школы кейс-метода – американская Гарвардская и европейская Манчестерская [2]. Первая школа главной целью метода считает обучение поиску единственно верного решения, вторая предполагает многовариантность решений. Как правило, решение кейса состоит из нескольких шагов:

- 1) Исследование предложенной ситуации (собственно, кейса);
- 2) Сбор и анализ недостающей информации;
- 3) Обсуждение возможных вариантов решения проблемы;
- 4) Выработка наилучшего решения.

Специалисты отмечают следующие три характерные особенности кейс-метода [1]:

- кейс не имеет правильного (эталонного) ответа; эффективных решений может быть несколько, главная задача – выбрать оптимальное;
- входные данные кейса могут противоречить друг другу или постоянно меняться, поскольку кейс строится на реальных фактах и имитирует настоящую жизненную ситуацию;
- как правило, кейсы решаются в условиях ограниченного времени, что вполне соответствует реальным ситуациям.

Обычно за основу кейса берется ситуация, произошедшая в конкретной компании.

При необходимости бизнес-ситуация заостряется, и в нее закладывается проблема, провоцирующая дискуссию.

Кейс-метод, несомненно, способствует приобретению многих компетенций, в числе которых: общекультурные – способность использовать, обобщать и анализировать информацию, готовить обзоры научной литературы, самостоятельно приобретать новые знания и умения и т.д.; профессиональные – способность применять к решению прикладных задач базовые алгоритмы, выполнять оценку сложности алгоритмов, моделировать и проектировать структуры данных и другие. Применительно к программированию, казалось бы, любую нечетко сформулированную задачу можно считать кейсом. Однако целью обучения является приобретение структурированного знания, поэтому для любого задания необходимо понимание того, на приобретение каких именно компетенций оно направлено. Разумно предложить рассматривать в обучении программированию кейс-задания трех уровней:

- 0 – задания на закрепление пройденного материала;
- 1 – задания на самостоятельное изучение нового материала;
- 2 – настоящие кейсы, в которых рассматривается реальная (или близкая к реальной) ситуация, причем поиск недостающей информации, выбор алгоритма и даже (возможно) выбор языка программирования предоставляются студенту.

В качестве иллюстрации предлагаемых подходов приведем несколько примеров.

Пример 1. Уровень 0. Изучите фрагмент программного кода и выполните задания (язык программирования PascalABC.NET).

```
var x := ReadReal;  
if x <= 1 then k := 0;  
if (x > 1) and (x <= 5) then k := 1;
```

```
if x > 5 then k := 2;
  case k of
    1: y := sin(sqrt(x));
    2: y := exp(2/x);
    3: y := sqrt(x*x - ln(x))
  end;
writeln ('x = ', x:5:2, ' ', 'y = ', y:6:2);
```

1. Фрагмент программы выполняет следующие действия (выберите все верные утверждения): выводит на экран значения x , не превосходящие 1; вычисляет значение числовой функции и выводит его на экран; определяет, принадлежит ли значение x промежутку $(1; 5]$; вычисляет значение логической функции y и выводит его на экран; вычисляет значения числовых функций x , y и k .

2. Замените условные операторы в строках 2-4 отдельной функцией или объясните, почему это сделать нельзя.

3. Измените в коде строки 2-9 таким образом, чтобы исключить переменную k .

4. Запишите формулу, которая использована в приведенном фрагменте, в обычной математической форме.

5. Измените код так, чтобы не использовать оператор `case`.

Заметим, что задания на анализ кода являются весьма эффективными при обучении программированию.

Пример 2. Уровень 1. Изучение темы «Символы и строки». Темы «Множества» и «Процедуры и функции» еще не рассматривались.

Задание. Дан массив строк. Определить количество гласных букв в нем. Использовать множество. Ввод и вывод массива организовать в виде процедур, а подсчет количества гласных букв – в виде функции. Такое задание лучше всего давать в качестве домашнего, поскольку его выполнение не требует поиска дополнительных источников, а лишь обычных учебников по программированию. После выполнения этого задания хорошо провести интерактивное практическое занятие с обсуждением тем, изученных самостоятельно, возможно в форме дискуссии.

Пример 3. Уровень 2. Результат физического эксперимента задан таблицей зависимости некоторого параметра C от времени.

Задание. Составить формулу для аналитического задания этой функции. Вывести на экран таблицу значений функции. Сравнить результаты. Метод аппроксимации выбрать самостоятельно. Можно использовать любой знакомый вам язык программирования. Указания. Отчет должен содержать следующую информацию:

- 1) Определение входных данных;
- 2) Метод аппроксимации с обоснованием его выбора;
- 3) Описание алгоритма;
- 4) Полученную формулу;
- 5) Листинг кода;
- 6) Дополнительно: сравнить полученную таблицу с исходной (вычислить коэффициент корреляции и другие статистические характеристики).

Для выполнения такого задания студентов можно объединить в группы по 2-3 человека, время на выполнение задания – 2 дня. Заметим, что три приведенных здесь уровня кейс-заданий соответствуют трем уровням компетенций «знать-уметь-владеть». Использование кейсов в обучении программированию имеет хорошие перспективы при условии тщательного подбора заданий и детального анализа результатов их выполнения.

Вывод. Анализ методологической и научно-методической литературы, а также многолетняя практика преподавания дисциплин, связанных с программированием на языках высокого уровня, свидетельствует о повышенном интересе к этому виду деятельности, поскольку во многих образовательных программах, как правило, присутствует целый спектр дисциплин этого типа [9, 10, 14]. Современные тренды рынка труда показывают, что программисты востребованы как у компаний ИТ-сектора, так и в других отраслях

экономики. Все это свидетельствует о необходимости четкой проработки учебного материала в рамках дисциплин, предполагающих освоение технологий и методов программирования, а также использование компетентностного подхода при разработке разноплановых оценочных материалов, мотивирующих обучающихся и максимально приближенных к реальным прикладным задачам.

Библиографический список:

1. Методика преподавания: оценка профессиональных компетенций у студентов: учебное пособие для вузов / В.Н. Белкина [и др.] – 2-е изд. – Москва: Издательство Юрайт, 2021. – 212 с.
2. Введение в кейс-метод: что такое кейсы и зачем они нужны [Электронный ресурс]. URL: <https://changellenge.com/article/chto-takoe-keysy/>
3. Долгоруков А. Метод case-study как современная технология профессионально-ориентированного обучения [Электронный ресурс]. URL: <https://evolkov.net/case/case.study.html>
4. Юрьева Т.А., Чалкина Н.А., Лебедь О.А. Применение кейс-метода в обучении бакалавров основам программирования. – Педагогические науки, 2016, выпуск: № 7 (49), часть 2. – С. 78-82.
5. Гафуанов Я.Ю., Поднебесова Г.Б. Оценка уровня сформированности компетенций будущих учителей информатики и IT-специалистов в области программирования // Современные проблемы науки и образования. – 2020. – № 1. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=29539>.
6. Еремина И.И., Садыкова А.Г. Методология оценки уровня сформированности информационно-коммуникационной компетентности будущих IT-профессионалов // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 10-10. – С. 2258-2264; URL: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=32747>
7. Шамсутдинов Т.М., Прокофьева С.В. Оценка практико-ориентированности профессиональных образовательных программ при подготовке IT-специалистов // Профессиональное образование и рынок труда, 2023, Т.11. №1, с.89-106. URL: <https://doi.org/10/52944/PORT.2023.52.1.006>
8. Круглик В.С., Осадчий В.В. Формирование компетентности в области программирования у будущих инженеров-программистов // Интеграция образования. 2029.Т 23. №4. С. 587-606. DOI: <https://doi.org/1.15507/1991-9468.097.023.201904.587-606>.
9. Максимов А.А. Разработка контрольно-оценочных средств по разделу «Информационные технологии» для оценки результатов обучения // Материалы XI Международной студенческой научной конференции «Студенческий научный форум» URL: <https://scienceforum.ru/2019/article/2018016434>
10. Захожая Т.М. Разработка фонда оценочных средств на основе компетентностной модели выпускника // Инновационное развитие: потенциал науки и современного образования: сборник статей III Международ. науч.- практ. конф. В 2 ч. 2018. с.182-187.
11. Поверинов И.Е., Митрофанова М.Ю., Григорьев А.В. К вопросу о разработке оценочных материалов при реализации образовательных программ в соответствии с федеральными государственными образовательными стандартами высшего образования третьего поколения (ФГОС ВО 3++), URL: <https://s.science-education.ru/pdf/2021/2/30657.pdf>
12. Образование. Аналитический отчет по определению структуры прогнозной потребности в IT-специалистах. — Иннополис: АНО ВО «Университет Иннополис», 2022. — с. 58: ил., табл. URL: https://innopolis.university/filespublic/Отчет_образование.pdf
13. Калитина В.В. Формирование программно-алгоритмической компетентности бакалавров информационных направлений при обучении программированию: дис. канд. наук: 13.00.02. Красноярский гос. университет, Красноярск, 2015 – 167 с. URL: <https://www.dissercat.com/>
14. Современные технологии в теории и практике программирования: сборник материалов конференции, 23.04.2020 г. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2020 – 175 с.
15. Кулешова М.В., Полетайкин А.Н. Методика разработки индикаторов достижения профессиональных компетенций и построения дескрипторной модели компетенций // Материалы LX межвузовской научно-методической конференции «Качество высшего и среднего профессионального образования в условиях перехода на Федеральные государственные образовательные стандарты нового поколения. Новосибирск, Изд-во: Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2019. – с.112-118.

References:

1. Teaching Methods: Assessment of Professional Competencies in Students: A Textbook for Universities / V.N. Belkina [et al.] - 2nd ed. - Moscow: Yurait Publishing House, 2021; 212. (In Russ)
2. Introduction to the Case Method: What Are Cases and Why Are They Needed [Electronic Resource]. URL: <https://changellenge.com/article/chto-takoe-keysy/>(In Russ)

3. Dolgorukov A. Case-study Method as a Modern Technology of Professionally-Oriented Learning [Electronic Resource]. URL: <https://evolkov.net/case/case.study.html> (In Russ)
4. Yuryeva T.A., Chalkina N.A., Lebed O.A. Application of the Case Method in Teaching Bachelors the Basics of Programming. – Pedagogical sciences, 2016;7 (49): 2:78-82. (In Russ)
5. Gafuanov Ya. Yu., Podnebesova G. B. Assessment of the level of formation of competencies of future computer science teachers and IT specialists in the field of programming. *Modern problems of science and education*. 2020; 1. URL: <https://science - education.ru/ru/article/view?id=29539>. (In Russ)
6. Eremina I. I., Sadykova A. G. Methodology for assessing the level of formation of information and communication competence of future IT professionals. *Fundamental research*. 2013;10-10:2258-2264; URL: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=32747> (In Russ)
7. Shamsutdinov T.M., Prokofieva S.V. Evaluation of the practice-oriented nature of professional educational programs in the training of IT specialists. *Professional education and the labor market*. 2023; 11(1):89-106. URL: <https://doi.org/10/52944/PORT.2023.52.1.006> (In Russ)
8. Kruglik V.S., Osadchiy V.V. Formation of competence in the field of programming among future software engineers. *Integration of education*. 2029;23(4):587-606. DOI: <https://doi.org/1.15507/1991-9468.097.023.201904.587-606>. (In Russ)
9. Maksimov A.A. Development of assessment tools in the section "Information Technology" for assessing learning outcomes. Proceedings of the XI International Student Scientific Conference "Student Scientific Forum" URL: <https://scienceforum.ru/2019/article/2018016434> (In Russ)
10. Zakhzhaya T.M. Development of a fund of assessment tools based on the competence model of a graduate. Innovative development: the potential of science and modern education: collection of articles of the III International. scientific-practical. conf. In 2 parts 2018;182-187. (In Russ)
11. Poverinov I.E., Mitrofanova M.Yu., Grigoriev A.V. On the development of assessment materials in the implementation of educational programs in accordance with the third-generation federal state educational standards of higher education (FSES VO 3++), URL: <https://s.science-education.ru/pdf/2021/2/30657.pdf> (In Russ)
12. Education. Analytical report on determining the structure of the forecast need for IT specialists. - Innopolis: ANO VO "Innopolis University", 2022;58: ill., table. URL: https://innopolis.university/filespublic/Education_Report.pdf (In Russ)
13. Kalitina V.V. Formation of software and algorithmic competence of bachelors of information sciences in teaching programming: dis. cand. sciences: 13.00.02. Krasnoyarsk State University, Krasnoyarsk, 2015;167 URL: <https://www.dissercat.com/> (In Russ)
14. Modern technologies in the theory and practice of programming: conference proceedings, 04/23/2020 - St. Petersburg: POLYTECH-PRESS, 2020;175. (In Russ)
15. Kuleshova M.V., Poletaikin A.N. Methodology for developing indicators for achieving professional competencies and constructing a descriptor model of competencies. Proceedings of the LX interuniversity scientific and methodological conference "Quality of higher and secondary vocational education in the context of the transition to the Federal state educational standards of the new generation. - Novosibirsk, Publishing house: Siberian State University of Telecommunications and Informatics, 2019;112-118. (In Russ)

Сведения об авторах:

Савина Елена Владимировна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры информационных технологий и информационной безопасности; elsavina@mail.ru

Раджабов Карахан Якубович, кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры информационных технологий и информационной безопасности; adrasman@mail.ru

Исабекова Тамила Илахиidinовна, кандидат физико-математических наук, доцент, заведующая кафедрой прикладной математики и информатики; mila775@mail.ru

Information about authors:

Elena V. Savina, Cand. Sci. (Physical and Mathemat.), Assoc. Prof., Department of Information Technology and Information Security; elsavina@mail.ru

Karakhan Ya. Radzhabov, Cand. Sci. (Econom.), Assoc. Prof., Assoc. Prof., Department of Information Technology and Information Security; adrasman@mail.ru

Tamila I. Isabekova, Cand. Sci. (Physical and Mathemat.), Assoc. Prof., Head of the Department of Applied Mathematics and Computer Science; mila775@mail.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 02.09.2024.

Одобрена после рецензирования/Revised 01.10.2024.

Принята в печать/ Accepted for publication 30.10.2024.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 004.492.4



DOI: 10.21822/2073-6185-2024-51-4-154-163

Обзорная статья/ Review article

Российские средства межсетевое экранирования для защищенных систем

А.М. Садыков¹, Р.Р. Ямалетдинов², Д.И. Сабирова¹

¹Казанский национальный исследовательский технологический университет,

¹420015, г. Казань, ул. Карла Маркса, 68, Россия,

²ООО «АйСиЭл СТ»,

²420029, Казань, ул. Сибирский тракт, д. 34 к.1, Россия

Резюме. Цель. Цель работы заключается в сравнительном анализе российского рынка средств межсетевое экранирования для защищенных систем. Резкое увеличение спроса на продукцию отечественных производителей связано с необходимостью отказа от использования зарубежной продукции в сфере информационной безопасности и перехода на средства защиты информации, произведенные в России. **Метод.** В качестве методов исследования используются: систематизация, описание и анализ. В работе анализ функционала будет проведен в отношении следующих решений: изделие «Универсальный шлюз безопасности «UserGate», комплекс безопасности «Континент 4», программно-аппаратный комплекс «ViPNet xFirewall 5», программный комплекс «Межсетевой экран с системой обнаружения вторжений Idecu UTM». **Результат.** В качестве параметров для сравнения средств межсетевое экранирования были выбраны: функциональность межсетевых экранов как сетевого оборудования, как средства защиты, возможности кластеризации, соответствие требованиям ФСТЭК. Проведенный анализ средств межсетевое экранирования показал, что российский рынок предлагает пользователям достойные аналоги зарубежных продуктов. Однако у рассматриваемых решений отсутствуют некоторые функциональные возможности, что, в свою очередь, указывает на недостаточную зрелость отечественного рынка межсетевых экранов. **Вывод.** Принятие решения о выборе должно быть продиктовано требованиями конкретной организации, исходя из запросов потребителя на функциональность или стабильность работы файрвола.

Ключевые слова: информационная безопасность, средства защиты информации, межсетевой экран, файрвол, импортозамещение, ФСТЭК

Для цитирования: А.М. Садыков, Р.Р. Ямалетдинов, Д.И. Сабирова. Российские средства межсетевое экранирования для защищенных систем. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2024; 51(4):154-163. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-4-154-163

Russian firewall screening tools for secured systems

A.M. Sadykov¹, R.R. Yamaletdinov², D.I. Sabirova¹

¹Kazan National Research Technological University,

¹68 Karl Marks St., Kazan 420015, Russia,

²LLC «Iciel System Technologies»,

²34 Sibirsky Trakt St. build. 1, Kazan 420029, Russia

Abstract. Objective. The purpose of the work is to make the comparative analysis of the firewall tools for secure systems on the Russian market. The sharp increase in demand for products from domestic developers is associated with the need to abandon the use of foreign information security tools and transition to Russian analogues. **Method.** Systematization, description and analysis are used as research methods. In this work functional analysis will be carried out in relation to the following solutions: «Universal security gateway «UserGate», security complex «Continent 4», hardware and software complex «ViPNet xFirewall 5», «Firewall with Idecu

UTM intrusion detection system». **Result.** For comparison of firewall tools the following parameters were chosen: functionality of firewalls as network equipment, as means of protection, possibility of clustering, compliance with FSTEC requirements. The analysis of firewall tools showed that the Russian market offers to users worthy analogues of foreign products. However in this solutions some functionality is missing, which indicates the insufficient maturity of the domestic market of firewalls. **Conclusion.** The choice decision should be dictated by the requirements of a particular organization, based on consumer requests for the functionality or stability of the firewall.

Keywords: information security, information security tools, firewall, import substitution, FSTEC

For citation: A.M. Sadykov, R.R. Yamaletdinov, D.I. Sabirova. Russian firewall screening tools for secured systems. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2024; 51(4):154-163. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-4-154-163.

Введение. Защита сетевого периметра - одна из самых актуальных задач по обеспечению информационной безопасности любой компании, у которой есть доступные из интернета ресурсы. В соответствии со статистикой ГК «Солар», построенной на основании информации об инцидентах в ИБ, выявленных Solar JSOC, в 1-м квартале 2023 года число кибератак увеличилось на 43 %, при этом доля сетевых атак выросла с 7 % до 8 % [1].

1 мая 2022 года был издан Указ Президента Российской Федерации № 250 «О дополнительных мерах по обеспечению информационной безопасности Российской Федерации», который устанавливает, что «с 1 января 2025 года субъектам критической информационной инфраструктуры Российской Федерации запрещается использовать иностранное программное обеспечение, странами происхождения которых являются иностранные государства, совершающие в отношении Российской Федерации, российских юридических лиц и физических лиц недружественные действия, либо производителями которых являются организации, находящиеся под юрисдикцией таких иностранных государств, прямо или косвенно подконтрольные им либо аффилированные с ними» [2].

Данный нормативно-правовой акт указывает на необходимость отказа от использования зарубежной продукции в сфере информационной безопасности и перехода на отечественные средства защиты информации. Это требование привело к резкому увеличению спроса на продукцию отечественных производителей, в частности на средства межсетевого экранирования. Отечественные разработчики были вынуждены в срочном порядке и в очень краткий срок начать разработку собственных продуктов, имеющих функционал и производительность максимально приближенные к лучшим иностранным аналогам.

Таким образом, в связи с бурным развитием российского рынка средств межсетевого экранирования, и активным ростом целенаправленных киберугроз, вопросы импортозамещения и обеспечения сетевой безопасности информационных систем приобретают особую важность.

Постановка задачи. На основе требований регулятора в области технической защиты информации и определенных наиболее важных критериев провести анализ предлагаемых отечественным рынком средств межсетевого экранирования для использования в защищенных автоматизированных системах.

Согласно Требованиям к межсетевым экранам, утвержденные приказом ФСТЭК России от 9 февраля 2016 г. № 9, межсетевой экран (МЭ) представляет собой «программное или программно-техническое средство, реализующее функции контроля и фильтрации в соответствии с заданными правилами проходящих через них информационных потоков и используемым в целях обеспечения защиты некриптографическими методами, информации, содержащей сведения, составляющие государственную тайну, иной информации ограниченного доступа» [3].

Методы исследования. Как правило МЭ устанавливаются на границе информационной системы или между границами сегментов. Такая практика полезна тем, что проходящий поток данных фильтруется, и обрабатывается не только при пересечении внешнего периметра, но и при хождении в локальной вычислительной сети.

В соответствии с отчетом «Magic Quadrant for Network Firewalls» 2022 года выделяются следующие лидеры на иностранном рынке: Palo Alto Networks, Fortinet, Check Point Software technologies [4]. Они обладают максимальными функциональными возможностями и производительностью, что позволяет использовать их в крупном и малом бизнесе. Изучив данные решения, можно выделить наиболее важные критерии выбора средства межсетевого экранирования:

- функциональность как сетевого устройства – средство межсетевого экранирования встраивается в сетевую инфраструктуру, следовательно, оно должно иметь возможность размещения в роли роутера, коммутатора или моста;

- функциональность как средства защиты информации – МЭ должен обеспечивать защиту на высоком уровне от атак, вирусов и других уязвимостей, передаваемых сетевым путем;

- возможность кластеризации – важнейшая функция сетевого оборудования, обеспечивающее инфраструктуре практически мгновенное автоматическое реагирование на отказ элемента системы.

Можно выделить следующие параметры функциональности на уровне сетевого оборудования:

- маршрутизация. Как правило, средство межсетевого экранирования устанавливается между сегментами инфраструктуры, будь то логическая или физическая граница, сети на разных портах устройства фигурируют различные, следовательно, фаервол должен уметь направлять трафик в правильную сеть, руководствуясь маршрутами;

- NAT (Network Address Translation). Сетевой функционал NAT был создан для группировки IP-адресов в один в пользу экономии сетевого пространства. Но данное свойство – скрывать внутренние IP-адреса за внешним, служит и для обеспечения безопасности устройств. Тем самым, злоумышленник, находящийся во внешней сети и зная внешний адрес компании, не знает внутренних адресов ресурсов организации [5];

- поддержка распространенных протоколов динамической маршрутизации. Важность данной функции обусловлена тем, что крупные компании выстраивают маршруты внутри своей сети с помощью протоколов динамической маршрутизации, следовательно, устройство фильтрации трафика, тоже должно уметь передавать свои маршруты. Помимо этого, существуют продукты, для правильной работы которых, необходимо пользоваться динамическим протоколом маршрутизации, например, КриптоПро NGate, в котором осуществляется балансировка VPN сессий с помощью протокола OSPF;

- агрегация. Как правило, средство межсетевого экранирования имеет небольшое количество физических сетевых портов. Для корректного разделения сетевой инфраструктуры на сегменты, на портах создают виртуальные интерфейсы – bond, превращая один физический порт в несколько логических. Так же, бонд позволяет совмещать логически несколько физических портов, обеспечивая большую пропускную способность и дополнительную отказоустойчивость продукта;

- контроль пропускной способности. Немаловажной функцией является контроль пропускной способности зон. Это помогает правильно регулировать сетевой ресурс, избегая его переполнения и нарушения доступности информации;

- производительность. Любая вычислительная система имеет свой предел нагрузки. В сетевом оборудовании важно, чтобы производительность была достаточной для работы оборудования во время пиковой загруженности, иначе устройство может отказать. К производительности можно отнести максимальную скорость физических портов, объем дискового пространства и оперативной памяти, а также вычислительную мощность процес-

сора. Можно выделить следующие параметры функционала средства межсетевое экранирования как средства защиты информации:

- фильтрация на основе отслеживания состояния соединений – позволяет отслеживать не отдельные передающиеся пакеты, а полноценное устанавливаемое соединение;

- VPN (Virtual Private Network) позволяет объединить локальные вычислительные сети, их сегменты или отдельные компьютеры предприятия в единую защищенную виртуальную сеть на базе общедоступных каналов передачи данных;

- IPS (Intrusion Prevention System). «Система предотвращения вторжений» позволяет выявлять и блокировать соединения по которому передаются эксплойты, и прочие уязвимости. IPS должен уметь определять вторжения на базе: сигнатур уязвимостей, статических аномалий, анализа протоколов и созданных вручную сигнатур.

Средство межсетевое экранирования должно иметь возможность периодического обновления сигнатур уязвимостей, управления политиками IPS, сбора дампа трафика при срабатывании политики IPS, категорирования действий IPS по разным профилям;

- защита от DoS – возможность защиты веб-серверов, конечных точек и самого средства межсетевое экранирования от распределенных атак типа «отказ в обслуживании»;

- контроль приложений – МЭ должен уметь классифицировать и контролировать не просто соединения, а соединения, направленные в сторону определенного приложения, например, «YouTube»;

- антивирус – наличие встроенного антивируса, для потоковой проверки передаваемых файлов и скриптов до их попадания конечному пользователю;

- веб-фильтрация – возможность фильтрации не только по ip-адресам, но и по веб-адресам сайтов;

- email фильтрация – позволяет МЭ анализировать электронную почту, проходящую через него, перенаправлять ее, отправлять содержимое для проверки на угрозы, а также фильтровать в зависимости от сконфигурированных параметров. Дает возможность настройки защиты сервисов электронной почты от спама, путем анализа содержимого писем и их источников;

- эмуляция подозрительных файлов – возможность безопасного запуска подозрительных файлов, на встроенной виртуальной системе, или в облаке для наблюдения за последствиями запуска файла;

- https инспекция – функционал позволяет фильтровать зашифрованные сетевые пакеты, путем проведения атаки «man-on-the-middle», когда сертификаты клиента и сервера подменяются на сертификаты МЭ. Данный функционал ограничен некоторым объемом расшифрованных данных пакета. Но с помощью функции глубокого анализа «DPI» - deep packet inspection, МЭ способен расшифровывать весь пакет, во вред производительности;

- user-based политики – должна иметься возможность построения политик доступа на основе пользователей, зарегистрированных в системе с помощью LDAP или гостевого портала;

- возможность создания правил с учетом даты и времени – возможность интегрировать в правила дату и время для более гибкой настройки политики безопасности;

- интеграция с серверами LDAP – наличие возможности синхронизации учетных записей с сервера LDAP, для централизованного управления доступом на основе прав пользователя;

- гостевой портал – наличие возможности настройки доступа для внедоменных пользователей, или гостей, не состоящих в группах LDAP;

- DNS Proxy – функционал позволяет перехватывать DNS запросы пользователей и изменять или перенаправлять их в зависимости от заданных администратором правил;

- централизованное управление – централизованное управление позволяет редактировать политики безопасности на множестве подчиненных устройствах межсетевое

экранирования с одного сервера, это минимизирует человеческий фактор при редактировании политик для группы машин. Так же, централизованное управление, позволяет установить уже созданную политику на новый брандмауэр, установленный в рамках расширения или замены предыдущего;

- передача на выделенный log сервер – наличие возможности передачи журналов действия на выделенный сервер журналирования, для экономии пространства на устройстве, и централизованного доступа к логам систем;

- различные роли доступа администраторов – МЭ должен обладать возможностью создания внутренних учетных записей с доступом только для чтения, или с доступом к ограниченному функционалу устройства;

- мультифакторная аутентификация – должна быть возможность интеграции с сервисами мультифакторной аутентификации для реализации многослойной, а значит более эффективной защиты аккаунта от несанкционированного доступа;

- логирование действий администратора – должна быть встроена система журналирования изменений устройства, для расследования инцидентов, связанных с ним;

- возможность передачи журналов в SIEM (Security information and event management) – наличие возможности автоматической передачи журналов в SIEM систему, для оперативного реагирования на инциденты, а также поиска и устранения уязвимостей;

- оповещения администраторов об инцидентах – возможность оповещения администраторов системы об изменениях, смене статуса оборудования и прочего;

- управление точками восстановления наличие возможности создавать точку восстановления МЭ, для возвращения к предыдущей конфигурации при неудачных обновлениях и прочих изменениях конфигурации.

Можно выделить следующие параметры функциональности по кластеризации:

- поддержка кластера отказоустойчивости. High-availability кластер – кластер отказоустойчивости, зачастую подразумевающий одновременно один активный узел. Другие элементы кластера находятся в режиме ожидания, пока активная нода не проявит признаки отказа. В момент аварии обрабатываемые данные передаются по выделенному каналу синхронизации на пассивный член кластера, и он переключается в активный, перехватывая всю работу на себя;

- кластер балансировки нагрузки. Load balancing кластер – кластер, в котором каждый элемент находится в активном состоянии и обрабатывает информацию. Входящий трафик равномерно распределяется между узлами кластера, обеспечивая увеличение максимально возможной нагрузки на оборудование.

Российский рынок средств межсетевого экранирования только в начале своего развития и в настоящее время представлен пока не очень большим количеством продуктов. Однако, крупные производители в области информационной безопасности анонсируют, что активно ведут разработку МЭ нового поколения. Вследствие чего ближайшее время количество предложений на рынке увеличится и их качество улучшится из-за выросшей конкуренции.

В работе анализ функционала будет проведен в отношении следующих отечественных решений:

1. Изделие «Универсальный шлюз безопасности «UserGate» [6].

2. Комплекс безопасности «Континент 4» [7].

3. Программно-аппаратный комплекс «ViPNet xFirewall 5» [8].

4. Программный комплекс «Межсетевой экран с системой обнаружения вторжений Idec0 UTM» [9].

Сравнение средств межсетевого экранирования по параметрам, характеризующим функциональность межсетевых экранов как сетевого оборудования, как средства защиты и вариантам кластеризации [6-14] представлено в табл. 1.

Таблица 1. Сравнение средств межсетевой экранирования, представленных на российском рынке
Table 1. Comparison of the firewall tools available on the Russian market

Параметр/ Parameter	Межсетевой экран/ Firewall			
	Usergate	Континент/ Continent 4	xFirewall 5	Ideco UTM 14
Функциональность межсетевых экранов как сетевого оборудования/ Functionality of firewalls as network equipment				
Маршрутизация	Маршрутизация на уровне ОС Unix	Маршрутизация на уровне ОС Unix	Маршрутизация на уровне ОС Unix	Маршрутизация на уровне ОС Unix
NAT	Имеется NAT как DNAT и SNAT	Имеется NAT как DNAT и SNAT	Имеется NAT как DNAT и SNAT	Имеется NAT как DNAT и SNAT
Поддержка распространенных протоколов динамической маршрутизации	OSPF, BGP, RIP	OSPF, BGP	OSPF, RIP	OSPF, BGP, RIP
Агрегация	Имеется	Имеется	Имеется	Отсутствует
Контроль пропускной способности	Правила управления пропускной способностью позволяют ограничить канал для определенных пользователей, хостов, сервисов, приложений.	Имеется возможность создавать правила приоритизации и маркировки трафика, указывать полосы пропускания для каждого приоритета и трафика в целом	Имеется возможность создавать правила приоритизации и маркировки трафика, указывать полосы пропускания для каждого приоритета и трафика в целом	Имеется возможность балансировки трафика в Мбит/с между внешними интерфейсами
Производительность ак сетевое оборудование	До 10Гбит/с	До 10Гбит/с	До 10Гбит/с	До 10Гбит/с
Производительность с активным файрволом	До 60 Гбит/с	До 80 Гбит/с	До 19 Гбит/с	До 76,3
Производительность со всеми включенными функциями	до 8 Гбит/с	До 7 Гбит/с	До 669 Мбит/с	До 3,7 Гбит/с
Максимальное кол-во сессий	48000000	10 000 000	9900000	5 000 000
Функциональность межсетевых экранов как средства защиты информации/ Functionality of firewalls as a means of information protection				
Фильтрация на основе отслеживания состояния соединений	Имеется	Имеется	Имеется	Имеется
IPS на основе сигнатур	Имеется	Имеется	Имеется	Имеется
IPS на основе статических аномалий	Имеется	Имеется	Имеется	Отсутствует
IPS по анализу состояний протоколов	Отсутствует	Отсутствует	Отсутствует	Отсутствует
VPN	В сертифицированной версии отсутствует. В несертифицированной поддерживаются протоколы L2TP, IPsec с Cisco. Поддерживает два типа VPN-сетей: Remote Access VPN и Site-to-Site VPN	Собственный стек протоколов. Симметричное шифрование в соответствии с ГОСТ 28147-89 Поддерживает Site-to-Site VPN. Клиент-серверные решения имеются в виде отдельных продуктов: Континент TLS и Континент АП	Только для канала управления. Для остального трафика отсутствует функционал СКЗИ. VPN реализуется с помощью ViPNet. Coordinator	Поддерживаются протоколы PPTP, PPPoE, IKEv2/IPsec, SSTP, L2TP/IPsec. Доступно VPN подключение на основе собственного клиента. Поддерживает два типа VPN-сетей: Remote Access VPN и Site-to-Site VPN. В сертифицированной версии VPN отсутствует.
Создание собственных сигнатур	Гибкая настройка правил обнаружения, есть возможность загрузить свои базы сигнатур и настроить их обновление	Имеется	Имеется	Отсутствует
Возможность категорировать действия IPS по разным профилям	Имеется	Отсутствует	Отсутствует	Отсутствует
Защита от DoS	Имеется	Имеется	Имеется	Имеется
Контроль веб-приложений	Для самых популярных соцсетей. Имеется возможность ограничивать отдельные действия в соцсетях	Для Facebook, LinkedIn, Instagram, Twitter	Для самых популярных соцсетей	Имеется возможность заблокировать доступ к ресурсам из нескольких десятков категорий, в т.ч., к социальным сетям.
Антивирус	Потоковый антивирус Usergate. Выявление сигнатур занимаются эксперты Центра мониторинга и реагирования UserGate (MRC-UG).	Отсутствует	Антивирусная защита с помощью Антивируса Касперского для Proxu Server	Антивирус Касперского. В сертифицированной версии отсутствует
Веб-фильтрация	Блокировка посещения потенциально опасных ресурсов, а также, когда это необходимо, сайтов, не связанных с работой	Блокировка посещения потенциально опасных ресурсов и сайтов из списка. Механизм работает как прокси, и устанавливает	Блокировка посещения потенциально опасных ресурсов, а также, когда это необходимо, сайтов, не связанных с работой	Блокировка определенных приложений, а также блокировка с помощью контент-фильтра

		соединение с веб-ресурсом от своего имени.		
Email фильтрация	Поддерживается работа с протоколами POP3 и SMTP. Позволяет проверять почтовый трафик антиспамом Usergate, проверять SMTP-трафик с помощью технологии DNSBL.	Поддерживается работа с протоколами IMAP, POP3 и SMTP	Фильтрация почты производится Антивирусом Касперского для Proxu Server	Поддерживается работа с протоколами IMAP, POP3 и SMTP
Встроенная или облачная эмуляция подозрительных файлов	Отсутствует	Отсутствует	Отсутствует	Отсутствует
https инспекция	Можно настроить инспектирование https только для определенных категорий трафика	Имеется	Имеется	Имеется
User-based политики	Имеется	Имеется	Имеется только по отношению к пользователям с LDAP сервера	Имеется
Возможность создания правил с учетом даты и времени	Имеется	Имеется	Имеется	Имеется
Интеграция с серверами LDAP	Имеется	Имеется	Имеется	Имеется
Гостевой портал	Имеется	Отсутствует	Отсутствует	Имеется
DNS Proxu	Имеется	Имеется	Имеется	Имеется
Централизованное управление	Имеется	Имеется	Имеется	Имеется Отсутствует в сертифицированной версии
Передача на выделенный log сервер	Имеется	Имеется	Имеется	Имеется
Различные роли доступа администраторов	Возможность создания учетных записей администраторов с различными правами на просмотр и изменение разделов конфигурации.	4 встроенные роли, возможность создания пользовательских, назначения нескольких ролей одному администратору	2 встроенные роли - пользователь и Администратор. Наличие нескольких вариантов УЗ Администратора (администратор всей сети ViPNet, администратор группы узлов, локальный администратор узла)	Две встроенные роли: Администратор и ReadOnly
Логирование действий администратора	Имеется	Имеется	Имеется	Только журнал авторизации пользователей
Возможность передачи журналов в SIEM	Имеется SNMP	Имеется SNMP	Имеется SNMP	Имеется SNMP
Мультифакторная аутентификация	Штатными средствами можно использовать TOTP как второй фактор, есть возможность подключать технологических партнеров из открытой экосистемы UserGate (Multifactor или Аладдин)	Отсутствует	Отсутствует	Двухфакторная аутентификация через сервис SMS Aero. Отсутствует в сертифицированной версии
Оповещения администраторов об инцидентах	SMTP, отправка сообщений по электронной почте	SMTP, отправка сообщений по электронной почте. SMPP, отправка сообщений с помощью SMS практически через любого оператора сотовой связи или через большое количество SMS-центров рассылки	Отсутствует	Оповещения через Telegram-bot
Управление точками восстановления	Только экспорт настроек	Экспорт политики безопасности	Экспорт справочников, лицензий и настроек	Создание встроенной резервной копии с возможностью выгрузки на FTP сервер
Варианты кластеризации/Clustering options				
Кластер отказоустойчивости	Объединение до 4 узлов	Имеется	Имеется, без синхронизации активных соединений	Имеется, без синхронизации активных соединений
Кластер балансировки нагрузки	Объединение до 4 узлов	Отсутствует	Отсутствует	Отсутствует

Как видно из табл. 1 некоторые функциональные возможности отсутствуют у рассматриваемых решений, что говорит о недостаточной зрелости отечественного рынка МЭ.

Требования к МЭ, утвержденные приказом ФСТЭК России от 9 февраля 2016 г. N 9, выделяют шесть классов защиты и их необходимость использования в информационных системах различных типов и классов, а также регламентируют 5 типов МЭ [3, 11]. Требования к МЭ для каждого типа и класса определены в соответствующих методиче-

ских документах, которые содержат профили защиты, утверждённых 12 сентября 2016 г. ФСТЭК России [11]. Спецификация профилей защиты представлена в табл. 2.

Таблица 2. Спецификация профилей защиты межсетевых экранов

Table 2. Specification of firewall protection profiles

Тип межсетево-го экрана/ Firewall type	Класс защиты/ Protection class					
	6	5	4	3	2	1
«А»	ИТ.МЭ.А6.ПЗ	ИТ.МЭ.А5.ПЗ	ИТ.МЭ.А4.ПЗ	ИТ.МЭ.А3.ПЗ	ИТ.МЭ.А2.ПЗ	ИТ.МЭ.А1.ПЗ
«Б»	ИТ.МЭ.Б6.ПЗ	ИТ.МЭ.Б5.ПЗ	ИТ.МЭ.Б4.ПЗ	ИТ.МЭ.Б3.ПЗ	ИТ.МЭ.Б2.ПЗ	ИТ.МЭ.Б1.ПЗ
«В»	ИТ.МЭ.В6.ПЗ	ИТ.МЭ.В5.ПЗ	ИТ.МЭ.В4.ПЗ	ИТ.МЭ.В3.ПЗ	ИТ.МЭ.В2.ПЗ	ИТ.МЭ.В1.ПЗ
«Г»	ИТ.МЭ.Г6.ПЗ	ИТ.МЭ.Г5.ПЗ	ИТ.МЭ.Г4.ПЗ	-	-	-
«Д»	ИТ.МЭ.Д6.ПЗ	ИТ.МЭ.Д6.ПЗ	ИТ.МЭ.Д6.ПЗ	-	-	-

В табл. 3 содержится информация о наличии у рассматриваемых средств межсетевого экранирования сертификатов ФСТЭК России, отмечены сведения о соответствии требованиям российского законодательства [15, 16].

Таблица 3. Сведения о сертификации

Table 3. Certification Information

Наименование/ Title	Сертификат/ Certificate	Соответствие требованиям документов/ Compliance with document requirements
Изделие «Универсальный шлюз безопасности «UserGate»	Сертификат ФСТЭК России №3905, действует до 26.03.2026	Требования доверия (4), Требования к МЭ, Профиль защиты МЭ (ИТ.МЭ.А4.ПЗ), Профиль защиты МЭ (ИТ.МЭ.Б4.ПЗ), Профиль защиты МЭ (ИТ.МЭ.Д4.ПЗ), Требования к СОВ, Профили защиты СОВ (сети четвертого класса защиты. ИТ.СОВ.С4.ПЗ)
Комплекс безопасности «Континент». Версия 4.	Сертификат ФСТЭК России №4496, действует до 14.12.2026	Требования доверия (4), Требования к МЭ, Профиль защиты МЭ (ИТ.МЭ.А4.ПЗ), Требования к СОВ, Профили защиты СОВ (сети четвертого класса защиты. ИТ.СОВ.С4.ПЗ)
Программно-аппаратный комплекс VipNet xFirewall 5	Сертификат ФСТЭК России №4501, действует до 28.12.2026	Требования доверия (4), Требования к МЭ, Профиль защиты МЭ (ИТ.МЭ.А4.ПЗ), Профиль защиты МЭ (ИТ.МЭ.Б4.ПЗ), Требования к СОВ, Профили защиты СОВ (сети четвертого класса защиты. ИТ.СОВ.С4.ПЗ), ЗБ
Программный комплекс Межсетевой экран с системой обнаружения вторжений Ideco UTM	Сертификат ФСТЭК России №4503, действует до 28.12.2026	Требования доверия (4), Требования к МЭ, Профиль защиты МЭ (ИТ.МЭ.А4.ПЗ), Профиль защиты МЭ (ИТ.МЭ.Б4.ПЗ), Требования к СОВ, Профили защиты СОВ (сети четвертого класса защиты. ИТ.СОВ.С4.ПЗ)

Все рассматриваемые средства межсетевого экранирования можно использовать в государственных информационных системах I класса защищенности, в автоматизированных системах управления производственными и технологическими процессами I класса защищенности, в информационных системах персональных данных I уровня защищенности персональных данных, в информационных системах общего пользования II класса.

Обсуждение результатов. Результаты проведенного исследования показывают, что на сегодняшний день самым функциональным отечественным средством межсетевого экранирования является UserGate. Он обладает почти всем востребованным функционалом, и в настоящее время, является наиболее приближенным к решениям мирового уровня. К основным недостаткам данного продукта можно отнести нестабильность работы. Администратор может столкнуться с проблемами, начиная от полного выхода оборудования из строя, заканчивая периодическими простоями сетевой инфраструктуры [6, 10].

Решение «Континент 4» является продуктом ООО «Код Безопасности» – одного из главных производителей средств защиты информации на отечественном рынке. К достоинствам данного МЭ можно отнести покрытие большего требуемого функционала, а также достаточно стабильную работу, но фактическая производительность «Континента 4» является низкой [7, 11].

На основании проведенного сравнительного анализа самым стабильным из рассматриваемых вариантов можно считать VipNet xFirewall 5. Однако данное средство межсетевого экранирования, несмотря на свои преимущества, является самым нефункцио-

нальным и наименее производительным. Основным недостатком является невозможность его развертывания без покупки и лицензирования дополнительного средства криптографической защиты информации – VipNet Coordinator [8, 12].

Ideco UTM имеет простой и понятный веб-интерфейс управления, что сильно выделяет его среди конкурентов, однако обладает слабым функционалом: например, в нем плохо проработан CLI интерфейс командной строки, а сертифицированная версия совсем ограничена в возможностях. Тем не менее Ideco UTM показывает достаточно стабильную работу [9, 13].

Вывод. Проведенный сравнительный анализ средств межсетевого экранирования показал, что российский рынок предлагает пользователям достойные аналоги зарубежных продуктов. Однако у рассмотренных решений отсутствуют некоторые функциональные возможности, что говорит о недостаточной зрелости отечественного рынка МЭ. Принятие решения о выборе должно быть продиктовано требованиями конкретной организации, исходя из запросов потребителя на функциональность или стабильность работы файрвола. На основании проведенного исследования было выявлено, что наиболее функциональными средствами межсетевого экранирования можно считать UserGate и «Континент 4». Удовлетворить потребность пользователя в стабильной и бесперебойной работе с большей вероятностью удастся продукту VipNet xFirewall 5 и МЭ Ideco UTM.

Библиографический список:

1. Обзор рынка NGFW — 2023 // Анализ рынка информационной безопасности в России [Электронный ресурс]. - URL: https://www.anti-malware.ru/analytics/Market_Analysis/NGFW-2023 (дата обращения: 21.03.2024).
2. О дополнительных мерах по обеспечению информационной безопасности Российской Федерации: Указ Президента Российской Федерации от 01.05.2022 № 250 (последняя редакция) [Электронный ресурс]. URL:<http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202205010023> (дата обращения: 21.03.2024).
3. Информационное сообщение ФСТЭК «Об утверждении требований к межсетевым экранам» от 28 апреля 2016 г. N 240/24/1986 (последняя редакция) [Электронный ресурс]. – URL: <https://fstec.ru/dokumenty/vse-dokumenty/informatsionnye-i-analiticheskie-materialy/informatsionnoe-soobshchenie-fstek-rossii-ot-28-aprelya-2016-g-n-240-24-1986> (дата обращения: 21.03.2024).
4. Recognized in 2022 Gartner Magic Quadrant for Network Firewalls for the 13th time [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.fortinet.com/solutions/gartner-network-firewalls> (дата обращения: 21.03.2024).
5. От частного к общему: разбираемся в принципах работы Network Address Translation (NAT) [Электронный ресурс]. – URL: <https://habr.com/ru/companies/otus/articles/779970/> (дата обращения: 21.03.2024).
6. Официальный сайт UserGate [Электронный ресурс]. URL: <https://www.usergate.com/ru> (дата обращения: 21.03.2024).
7. Официальный сайт код безопасности Континент 4 [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.securitycode.ru/products/kontinent-4/> (дата обращения: 21.03.2024).
8. Официальный сайт VipNet xFirewall 5 [Электронный ресурс]. – URL: [//infotecs.ru/product/vipnet-xfirewall-5.html#docs](https://infotecs.ru/product/vipnet-xfirewall-5.html#docs) (дата обращения: 21.03.2024).
9. Официальный сайт Ideco UTM [Электронный ресурс].URL: <https://ideco.ru/> (дата обращения: 21.03.2024).
10. UserGate Руководство администратора [Электронный ресурс]. – URL: <https://docs.usergate.com/dokumentaciya-120/> (дата обращения: 21.03.2024).
11. Код безопасности Континент 4 Руководство администратора [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.securitycode.ru/products/kontinent-4/?tab=support> (дата обращения: 21.03.2024).
12. VipNet xFirewall 5 Руководство администратора [Электронный ресурс]. – URL: <https://infotecs.ru/downloads/documents/vipnet-xfirewall-5/> (дата обращения: 21.03.2024);
13. Ideco UTM 14 Руководство администратора [Электронный ресурс]. – URL: <https://docs.ideco.dev/v/v14> (дата обращения: 21.03.2024).
14. Православные NGFW [Электронный ресурс]. – URL: https://habr.com/ru/companies/icl_services/articles/701424/ (дата обращения: 21.03.2024).
15. Государственный реестр сертифицированных средств защиты информации [Электронный ресурс]. – URL: <https://reestr.fstec.ru/reg3> (дата обращения: 21.03.2024).

16. Информационное сообщение ФСТЭК «Об утверждении методических документов, содержащих профили защиты межсетевых экранов» от 12 сентября 2016 г. N 240/24/4278 (последняя редакция) [Электронный ресурс]. – URL: <https://fstec.ru/dokumenty/vse-dokumenty/informatsionnye-i-analiticheskie-materialy/informatsionnoe-soobshchenie-fstek-rossii-ot-12-sentyabrya-2016-g-n-240-24-4278> (дата обращения: 21.03.2024).

References:

1. NGFW market review - 2023 // Analysis of the information security market in Russia [Electronic resource]. URL: https://www.anti-malware.ru/analytics/Market_Analysis/NGFW-2023 (date of access: 03/21/2024). (In Russ).
2. On additional measures to ensure information security of the Russian Federation: Decree of the President of the Russian Federation dated 05/01/2022 No. 250 (latest edition) [Electronic resource]. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202205010023>(date of access: 03/21/2024). (In Russ).
3. Information message of FSTEC «On approval of requirements for firewalls» dated April 28, 2016 N 240/24/1986 (latest edition) [Electronic resource]. URL: <https://fstec.ru/dokumenty/vse-dokumenty/informatsionnye-i-analiticheskie-materialy/informatsionnoe-soobshchenie-fstek-rossii-ot-28-aprelya-2016-g-n-240-24-1986> (date of access: 03/21/2024). (In Russ).
4. Recognized in 2022 Gartner Magic Quadrant for Network Firewalls for the 13th time [Electronic resource]. URL: <https://www.fortinet.com/solutions/gartner-network-firewalls> (date of access: 03/21/2024).
5. From specific to general: understanding the principles of Network Address Translation (NAT) [Electronic resource]. URL: <https://habr.com/ru/companies/otus/articles/779970/>(date of access: 03/21/2024). (In Russ).
6. Official website of UserGate [Electronic resource]. URL: <https://www.usergate.com/ru> (date of access: 03/21/2024). (In Russ).
7. Official website security code Continent 4 [Electronic resource]. URL: <https://www.securitycode.ru/products/kontinent-4/> (date of access: 03/21/2024). (In Russ).
8. Официальный сайт VipNet xFirewall 5 [Electronic resource]. URL: <https://infotecs.ru/product/vipnet-xfirewall-5.html#docs> (date of access: 03/21/2024). (In Russ).
9. Ideco UTM official website [Electronic resource]. URL: <https://ideco.ru/>(date of access: 03/21/2024). (In Russ).
10. UserGate Administrator's Guide [Electronic resource]. URL: <https://docs.usergate.com/dokumentaciya-120/> (date of access: 03/21/2024). (In Russ).
11. Security code Continent 4 Administrator's Guide [Electronic resource]. URL: <https://www.securitycode.ru/products/kontinent-4/?tab=support> (date of access: 03/21/2024). (In Russ).
12. VipNet xFirewall 5 Administrator Guide [Electronic resource]. URL: <https://infotecs.ru/downloads/documents/vipnet-xfirewall-5/> (date of access: 03/21/2024). (In Russ).
13. Ideco UTM 14 Administrator Guide [Electronic resource]. URL: <https://docs.ideco.dev/v/v14> (date of access: 03/21/2024). (In Russ).
14. Orthodox NGFW [Electronic resource]. URL: https://habr.com/ru/companies/icl_services/articles/701424/ (date of access: 03/21/2024). (In Russ).
15. State Register of Certified Information Security Tools [Electronic resource]. URL: <https://reestr.fstec.ru/reg3> (date of access: 03/21/2024). (In Russ).
16. Information message of FSTEC “On approval of methodological documents containing firewall protection profiles” dated September 12, 2016 N 240/24/4278 (latest edition) [Electronic resource]. URL: <https://fstec.ru/dokumenty/vse-dokumenty/informatsionnye-i-analiticheskie-materialy/informatsionnoe-soobshchenie-fstek-rossii-ot-12-sentyabrya-2016-g-n-240-24-4278> (date of access: 03/21/2024). (In Russ).

Сведения об авторах:

Садыхов Александр Мунирович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Информационная безопасность»; alex.sadykov@mail.ru. ORCID 0009-0005-8893-7846.

Ямалетдинов Роман Русланович, старший системный инженер; yamaletdinov.r2000@gmail.com

Сабирова Динара Илнуровна, кандидат химических наук, доцент кафедры «Информационная безопасность»; dinka-sab@mail.ru. ORCID 0009-0007-5066-5907

Information about authors:

Alexander M. Sadykov, Cand. Sci. (Eng), Assoc. Prof., alex.sadykov@mail.ru, ORCID 0009-0005-8893-7846.

Roman R. Yamaletdinov, Senior Systems Engineer; yamaletdinov.r2000@gmail.com.

Dinara I. Sabirova, Cand. Sci. (Eng), Assoc. Prof., dinka-sab@mail.ru, ORCID 0009-0007-5066-5907.

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/ Received 12.06.2024.

Одобрена после рецензирования/ Revised 12.07.2024.

Принята в печать/ Accepted for publication 10.10.2024.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 004.046



DOI: 10.21822/2073-6185-2024-51-4-164-170 Оригинальная статья /Original article

Методы семантического анализа состояния процесса функционирования системы обнаружения, предупреждения и ликвидации последствий компьютерных атак

В.О. Шаблия, С.А. Коноваленко, Е.О. Орлов

Краснодарское высшее военное орденов Жукова и Октябрьской Революции
Краснознаменное училище имени генерала армии С.М.Штеменко,
350063, г. Краснодар, ул. Красина, д. 4, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является определение наиболее эффективного метода семантического анализа состояния процесса функционирования системы обнаружения, предупреждения и ликвидации последствий компьютерных атак. **Метод.** Исследование проведено на основании методов семантического анализа состояния процесса функционирования СОПКА. **Результат.** Предложена структурная модель системы семантического анализа состояния процесса функционирования СОПКА, способная в полной мере обеспечить анализ состояния процесса функционирования системы обнаружения, предупреждения и ликвидации последствий компьютерных атак. Определено, что наиболее эффективным методом решения задачи семантического анализа состояния процесса функционирования СОПКА является машинное обучение с применением онтологического моделирования объекта анализа. **Вывод.** Необходимы дальнейшие исследования в части разработки предлагаемой системы семантического анализа состояния процесса функционирования системы обнаружения, предупреждения и ликвидации последствий компьютерных атак.

Ключевые слова: система обнаружения, предупреждения, ликвидации последствий компьютерных атак, семантический анализ, семиотика, онтология, машинное обучение

Для цитирования: В.О. Шаблия, С.А. Коноваленко, Е.О. Орлов. Методы семантического анализа состояния процесса функционирования системы обнаружения, предупреждения и ликвидации последствий компьютерных атак. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2024; 51(4):164-170. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-4-164-170

Methods for semantic analysis of the state of the process of functioning of a system for detecting, preventing and eliminating the consequences of computer attacks

V.O. Shablya, S.A. Konovalenko, E.O. Orlov

General S.M. Shtemenko Krasnodar Higher Military Orders of Zhukov
and the October Revolution Red Banner School,
4 Krasina St., Krasnodar 350063, Russia

Abstract. Objective. The aim of the study is to determine the most effective method of semantic analysis of the state of the process of detection, prevention and elimination of consequences of computer attacks. **Method.** The study was conducted based on the methods of semantic analysis of the state of the process of SOPKA operation. **Result.** A structural model of the system of semantic analysis of the state of the process of SOPKA operation is proposed, which is capable of providing an analysis of the state of the process of detection, prevention and elimination of consequences of computer attacks. The most effective method for solving the problem of semantic analysis of the state of the process of SOPKA operation is machine learning using ontological modeling. **Conclusion.** The results indicate the need for further research of the sys-

tem of semantic analysis of the state of the process of detection, prevention and elimination of consequences of computer attacks.

Keywords: system for detecting, preventing and eliminating the consequences of computer attacks, semantic analysis, semiotics, ontology, machine learning

For citation: V.O. Shablya, S.A. Konovalenko, E.O. Orlov. Methods for semantic analysis of the state of the process of functioning of a system for detecting, preventing and eliminating the consequences of computer attacks. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2024; 51(4):164-170. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-4-164-170.

Введение. Современная практика применения системы обнаружения, предупреждения и ликвидации последствий компьютерных атак (СОПКА) свидетельствует о необходимости систематического проведения анализа состояния процесса функционирования (ПФ) её структурных элементов [1-2]. При этом существующие подходы к анализу в заданной предметной области основываются исключительно на прямом методе анализа, зависящем от полноты предоставляемых параметрических данных (ПД) о текущем состоянии ПФ СОПКА и реализуемом специалистом по информационной безопасности (ИБ), что в общем негативно влияет на эффективность решения рассматриваемой задачи [3]. Обзор существующих теоретических и практических аспектов в заданной предметной области показал, что возможным решением указанной проблемы является применение семиотического подхода к анализу состояния ПФ СОПКА, в рамках которого реализуются синтаксический, семантический и прагматический этапы анализа.

Постановка задачи. В данной статье рассматривается семантический анализ (СМА), который в настоящее время реализуется в условиях отсутствия единого формализованного подхода, а также базируется на конкретных методах, обладающих определенными недостатками, не позволяющими оперативно решить задачу анализа состояния ПФ СОПКА с учетом особенностей её построения и режимов функционирования (РЖФ) [1].

Целью исследования является определение наиболее эффективного метода семантического анализа состояния процесса функционирования системы обнаружения, предупреждения и ликвидации последствий компьютерных атак.

Методы исследования. Рассмотрим основные методы, способные выполнять СМА состояния ПФ СОПКА (рис. 1): метод распознавания именованных сущностей; метод основанный на использовании тезауруса; метод лексического анализа; метод машинного обучения; метод глубокого обучения; метод онтологического моделирования; метод семантического дифференциала.



Рис. 1. Основные методы СМА состояния ПФ СОПКА
Fig. 1. Basic methods of SMA of the state of PF SOPKA

В целях определения наиболее эффективного метода, способного повысить оперативность исследуемого процесса, рассмотрим основные достоинства и недостатки существующих методов СМА состояния ПФ СОПКА (табл.1) [3-15]:

Таблица 1. Достоинства и недостатки существующих методов СМА состояния ПФ СОПКА
Table 1. Advantages and disadvantages of existing methods of SMA of the state of the PF SOPKA

Наименование метода СМА Name SMA	Достоинства Advantages	Недостатки Disadvantages
Распознавание Именованных сущностей Named Entity Recognition	позволяет идентифицировать различные именованные сущности посредством анализа ПД с учетом особенностей их написания; позволяет улучшить качество поисковых запросов, за счет выделяемых свойств ПД/ allows you to identify different named entities; allows you to improve the quality of search queries.	недостаточно эффективно классифицирует именованные сущности в тексте при обработке поступающих нестандартно расположенных ПД; недостаточный объем словаря синтаксических конструкций для различных языков/insufficiently classifies named entities in the text when processing incoming non-standardly located PD; insufficient volume of the dictionary for different languages
Тезаурус Thesaurus	учитывает семантические отношения между словами, что помогает уточнить семантические особенности и связи между ПД, улучшающие правильность понимания и интерпретацию текстовых данных/ takes into account the semantic relationships between words, which helps to clarify the semantic features and connections between PD, improving the correctness of understanding and interpretation of text data	представляет собой структуру устойчивых и заранее определенных семантических отношений между ПД, которые не учитывают контекстуальные изменения в значениях слов или различия при использовании в разных предметных областях; при изменении корпуса текстов и при повторной векторизации меняются числовые коэффициенты, что приводит к потребности дополнительных ресурсов/do not take into account contextual changes in the meanings of words or differences in use in different subject areas; when the text corpus changes and when re-vectorizing, the numerical coefficients change, which leads to the need for additional resources
Лексический анализ Lexical Analysis	позволяет разбить текст на отдельные слова, что упрощает дальнейший анализ и понимание семантики текста; по форме слова, по его сущности можно понять какое место, роль в предложении оно занимает/ allows you to break the text into separate words, you can understand what place, role in the sentence it occupies	допускает ошибки в распознавании некоторых символов, особенно при обработке текста с опечатками или при некорректности ПД; не информативен в аспекте выявления семантической информации в ПД, выделяя только их лексическое значение, роль в предложении/makes mistakes in recognizing some symbols, especially when processing text with typos or when the PD is incorrect; not informative in terms of identifying semantic information in the PD
Машинное обучение Machine Learning	высокая оперативность анализа большого объема ПД; высокая точность обработки ПД за счет обучения и дообучения модели СМА специалистом по ИБ/ high efficiency of analysis of a large volume of PD; high accuracy of PD processing due to training and additional training of the SMA model by an information security specialist	результаты анализа напрямую зависят от вида предобработанных ПД для обработки моделью машинного обучения; необходимость использования большого объема вычислительных, операционных и временных ресурсов/ the results of the analysis directly depend on the type of pre-processed PD for processing by the machine learning model; the need to use a large amount of computing, operational and time resources
Глубокое обучение Deep Learning	основано на нейронных сетях, которые могут определять сложные зависимости в ПД за счет подбора гиперпараметров и параметров машинного обучения; параметров машинного обучения, значения которых используются для управления процессом обучения нейронной сети/ based on neural networks that	требует большого количества предобработанных ПД для обучения, что может быть затруднительно, особенно для некорректных ПД или небольших наборов ПД; необходимость использования большого объема вычислительных, операционных и временных ресурсов/ requires a large number of pre-processed PDs for training, which can be difficult, especially for incorrect PDs or small sets of PDs; the need to use a large amount

Наименование метода СМА Name SMA	Достоинства Advantages	Недостатки Disadvantages
Онтологическое моделирование Ontology Modeling	гибкость настройки и повышение точности при формировании результатов поиска, позволяющее структурировать и описывать связи между понятиями в конкретной предметной области; онтология предоставляет организованную структуру и дает возможность учета семантических особенностей (холонимы, гипонимы и гиперонимы) для классификации ПД; содержит большой объем взаимосвязанных и упорядоченных ПД, что упрощает специалистом по ИБ их обработку; однозначность толкования относительно одного конкретного понятия между различными специалистами по ИБ/flexibility of customization and increased accuracy in generating search results; unambiguity of interpretation regarding one specific concept between different information security specialists	of computing, operational and time resources создание и поддержка онтологий представляет собой сложный и трудоемкий процесс; онтологии требуют аккуратной и точной формализации знаний группой специалистов по ИБ; интероперабельность, выраженная в сложности преобразования в единый формат получаемых ПД из различных источников знаний; отсутствие общего стандарта, универсальной методологии для создания онтологий/ creation and support of ontologies is a complex and labor-intensive process; ontologies require careful and precise formalization of knowledge by a group of information security specialists; interoperability, expressed in the complexity of converting the received PD from various knowledge sources into a single format; lack of a common standard, a universal methodology for creating ontologies
Семантический дифференциал Semantic Differential	относительная простота в использовании, заключающаяся в указании специалистами по ИБ своих предпочтений или оценок на шкалах, что делает данный метод относительно простым в применении и адаптации для различных задач анализа; шкалы метода семантического дифференциала могут охватывать различные аспекты семантики, что делает его относительно универсальным инструментом для анализа, подходящим для различных предметных областей/relative ease of use, the scales of the semantic differential method can cover various aspects of semantics, which makes it a relatively universal tool for analysis, suitable for various subject areas	анализ ПД ограничен выбранными специалистами по ИБ шкалами, что негативно отражается на последующей интерпретации и объективности полученных результатов анализа; интерпретация результатов анализа субъективна, и зависит от предположений специалиста по ИБ, особенно при анализе многофакторных ПД; сложность анализа, заключающаяся в необходимости применения как специальных статистических методов, так и дополнительного программного обеспечения при обработке ПД, что усложняет процесс анализа/ the analysis of PD is limited to scales selected by information security specialists, which negatively affects the interpretation and objectivity of the results; the interpretation of the analysis results is subjective and depends on the assumptions of the specialist; the complexity of the analysis, which consists in the need to use both special statistical methods and additional software when processing PD

Обсуждение результатов. Проведенный анализ существующих методов в рассматриваемой предметной области (табл.1) свидетельствует о том, что реализация СМА состояния ПФ СОПКА посредством какого-либо одного метода является недостаточно эффективным подходом.

При этом с учетом выявленных достоинств существующих методов СМА состояния ПФ СОПКА (табл. 1) повышение оперативности реализации исследуемого процесса может быть достигнуто за счет применения метода машинного обучения с использованием онтологического моделирования заданного объекта анализа. Кроме того, в целях возможной практической реализации СМА состояния ПФ СОПКА на основе метода машинного обучения с применением онтологического моделирования построим структурную модель соответствующей системы (рис. 2). Предназначение элементов структурной модели системы СМА состояния ПФ СОПКА (рис. 2) приведем в таб. 2.

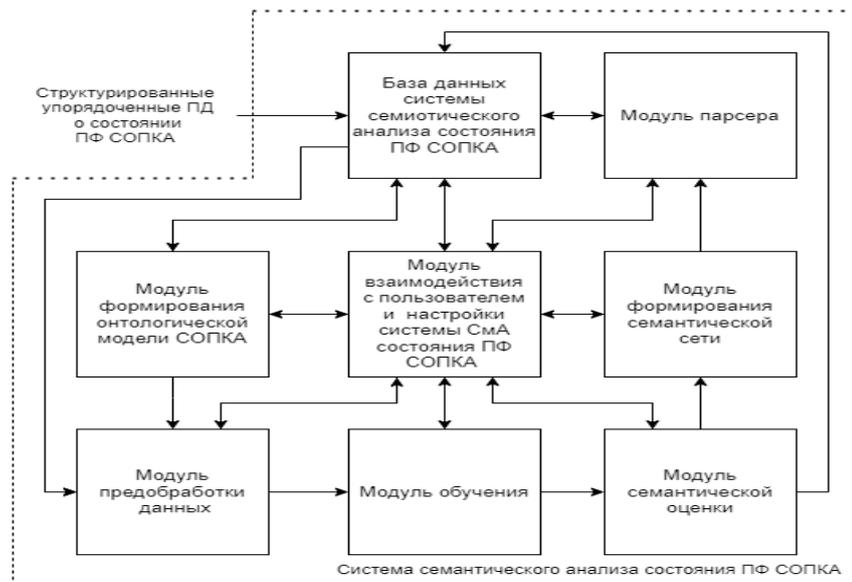


Рис. 2. Структурная модель предлагаемой системы СМА состояния ПФ СОПКА

Fig. 2. Structural model of the proposed SMA system for the state of PF SOPKA

Таблица 2. Предназначение элементов структурной модели системы СМА состояния ПФ СОПКА

Table 2. Purpose of the elements of the structural model of the system of the SMA state of the PF SOPKA

Наименование элемента Name of the element	Функциональное предназначение элемента Functional purpose of the element
База данных системы семиотического анализа состояния ПФ СОПКА Database of the semiotic analysis system of the state of the PF SOPKA	предназначена для длительного хранения и обработки: ПД о состоянии ПФ СОПКА, выделяемых из различных источников знаний и предоставляемых в виде соответствующих экзофреймовых структур; онтологической модели СОПКА; семантической сети, определяющей взаимосвязь между различными источниками знаний продукционно-фреймовых структур ПД о состоянии ПФ СОПКА и различных источников знаний СОПКА, онтологии СОПКА, семантической сети между ПД о состоянии ПФ СОПКА и их различными источниками знаний СОПКА/is intended for long-term storage and processing of: PD on the state of the SOPKA PF, extracted from various knowledge sources; ontological model of SOPKA; semantic network, SOPKA ontology, semantic network between PD on the state of the SOPKA PF
Модуль формирования онтологической модели СОПКА Module for forming the ontological model of SOPKA	предназначен для создания онтологической модели СОПКА в заданный момент времени ее функционирования/ is designed to create an ontological model of SOPKA at a given point in time of its operation
Модуль преобработки данных Data preprocessing module	предназначен для приведения структурированных упорядоченных ПД о состоянии ПФ СОПКА к виду, пригодному для обработки моделями машинного обучения/ is designed to bring structured ordered PD about the state of the PF SOPKA to a form suitable for processing by machine learning models
Модуль обучения Training module	предназначен для обучения и дообучения модели машинного обучения/ designed for training and retraining of machine learning models
Модуль семантической оценки Semantic evaluation module	предназначен для определения семантической близости между ПД из различных источников знаний о состоянии ПФ СОПКА/ is designed to determine the semantic proximity between PD from various sources of knowledge about the state of the PF SOPKA
Модуль парсера Parser module	предназначен для обработки линейной последовательности лексем (слов, токенов) естественного или формального языка, используемого специалистом по ИБ в заданной предметной области, с целью извлечения из базы данных системы семиотического анализа состояния ПФ СОПКА необходимой информации/is designed to process a linear sequence of lexemes (words, tokens) of a natural or formal language, in order to extract information from a database
Модуль взаимодействия пользователя и настройки системы СМА состояний ПФ СОПКА User interaction module and system configuration of the SMA states of the PF SOPKA	предназначен для настройки, управления системой и визуализации промежуточных результатов/ designed for setting up, managing the system and visualizing intermediate results
Модуль формирования семантической сети Module for the formation of a semantic network	предназначен для построения семантически связанной и упорядоченной структуры между ПД из различных источников знаний о состоянии ПФ СОПКА/ is designed to build a semantically linked and ordered structure between PD from various sources of knowledge about the state of the PF SOPKA

Вывод. Таким образом, проведенный анализ в заданной предметной области свидетельствует о том, что наиболее перспективным решением к семантическому анализу состояния процесса функционирования системы обнаружения, предупреждения и ликвидации последствий компьютерных атак является использование метода машинного обучения с применением онтологического моделирования.

Созданная в ходе исследования и представленная в статье модель системы семантического анализа способна в полной мере обеспечить анализ состояния процесса функционирования системы обнаружения, предупреждения и ликвидации последствий компьютерных атак.

Исходя из вышеуказанного, проведенный анализ существующих методов семантического анализа свидетельствует о необходимости дальнейшего исследования в разработке предлагаемой системы семантического анализа состояния процесса функционирования системы обнаружения, предупреждения и ликвидации последствий компьютерных атак.

Библиографический список:

1. Коноваленко С.А., Королев И.Д., Шабли В.О. Анализ процесса функционирования ведомственного сегмента системы обнаружения, предупреждения и ликвидации последствий компьютерных атак на критическую информационную инфраструктуру Вооруженных Сил Российской Федерации // Информационная безопасность – актуальная проблема современности. Совершенствование образовательных технологий подготовки специалистов в области информационной безопасности: материалы XXIII Всерос. межведомст. НТК, г. Краснодар 2021 г. / отв. ред. д.т.н., проф. А.В. Крупенин. – Краснодар: КВВУ, 2021. – Т. 2. – С. 80-90.
2. Шабли В.О., Коноваленко С.А., Едунов Р.В. Анализ процесса функционирования SIEM-систем // E-scio [Электронный ресурс]: Электронное периодическое издание "E-scio.ru" - Эл № ФС77-66730 - Режим доступа: http://e-scio.ru/wp-content/uploads/2022/05/Шабли_В.О.,Коноваленко_С.А.,Едунов_Р.-В.pdf
3. Коноваленко С.А., Шабли В.О., Титов Г.О. Анализ методов контроля состояния процесса функционирования сложных технических систем [Электронный ресурс]//Наукосфера.-2021,- № 12(2), С. 234.
4. Кульневич А.Д., Кошечкин А.А., Карев С.В., Замятин А.В. Подход к распознаванию именованных сущностей на примере технологических терминов в условиях ограниченной обучающей выборки. Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика, (58), с. 71-81.
5. Лесников, С.В. Тезаурус как отражение системности языка. Вестник Челябинского государственного университета, (28), С. 52-61.
6. Осокина С.А. Сетевая модель языкового тезауруса: особенности построения. Сибирский филологический журнал, (3), С. 191-198.
7. Лазутченкова, Е.А. Прагматический анализ в лексической семантике. Полилингвильность и транскультурные практики, (1), С. 62-65.
8. Боброва М.Б., Мاستилин А.Е. Машинное обучение в кибербезопасности. Научные междисциплинарные исследования, (2), С. 24-29.
9. Магжанова А.Т. Интеграция информационных источников с использованием кластер-анализа по схеме машинного обучения без учителя. Теория и практика современной науки, (6 (24)), С. 1037-1040.
10. Максютин П.А., Шульженко С.Н. Обзор методов классификации текстов с помощью машинного обучения. Инженерный вестник Дона, (12 (96)), С. 1-9.
11. Жиленков А.А., Силкин А.А., Серебряков М.Ю., Колесова С.В. Сравнительный анализ систем глубокого обучения с подкреплением и систем обучения с учителем. Известия Тульского государственного университета. Технические науки, (10), С. 109-112.
12. Столяров А.С., Раджабов Т.Р. Развитие ИИ, глубокое и машинное обучение. Теория и практика современной науки, (8 (38)), С. 70-80.
13. Папуша С.И. Онтология и графовые базы данных. Проблемы экономики и юридической практики, (3), С. 268-272.
14. Добров Б.В., Иванов В.В., Лукашевич Н.В., Соловьев В.Д. Онтологии и тезаурусы: модели, инструменты, приложения: учебное пособие [Электронный ресурс] / Б.В. Добров, В.В. Иванов, Н.В. Лукашевич, В.Д. Соловьев. — 2-е изд. (эл.) — Электрон, дан. и прогр. (3 Мб.) — М: Интернет-Университет Информационных Технологий; Саратов: Вузовское образование, 2017.
15. Хекало Т.В. Изучение личностных смыслов физико-химических объектов методом семантического дифференциала. Вопросы психолингвистики, 2016, С. 256-265.

References:

1. Konovalenko S.A., Korolev I.D., Shablya V.O. Analysis of the functioning of the departmental segment of the system for detecting, preventing and eliminating the consequences of computer attacks on the critical information infrastructure of the Armed Forces of the Russian Federation. Information security – an urgent problem of our time. Improving educational technologies for training specialists in the field of information security: materials of the XXIII Allround. interagency. NTC, Krasnodar, 2021 / ed., Doctor of Technical Sciences, prof. A.V. Krupenin. – Krasnodar: KVVU, 2021; 2: 80-90. (In Russ)
2. Shablya V.O., Konovalenko S.A., Edunov R.V. Analysis of the process of functioning of SIEM systems // Esco [Electronic resource]: Electronic periodical "E-scio.ru" - E-mail no. FS77-66730 - Access mode: <http://e-scio.ru/wp-content/uploads/2022/05/Шаблия-В.-О.-Коноваленко-С.-А.-Едунов-Р.-В.pdf> (In Russ)
3. Konovalenko S.A., Shablya V.O., Titov G.O. Analysis of methods for monitoring the state of the process of functioning of complex technical systems [Electronic resource]. *The science sphere*. 2021;12 (2): 234. (In Russ)
4. Kulnevich A.D., Koshechkin A.A., Karev S.V., Zamyatin A.V. An approach to the recognition of named entities by the example of technological terms in a limited training sample. *Bulletin of Tomsk State University. Management, Computer Engineering and Computer Science*, (58):71-81. (In Russ)
5. Lesnikov, S.V. Thesaurus as a reflection of the consistency of language. *Bulletin of the Chelyabinsk State University*, 28; 52-61. (In Russ)
6. Osokina S.A. The network model of the language thesaurus: features of construction. *Siberian Journal of Philology*, 3; 191-198. (In Russ)
7. Lazutchenkova, E. A. Pragmatic analysis in lexical semantics. *Polylingualism and Transcultural Practices*, 1: 62-65. (In Russ)
8. Bobrova M.B., Mastilin A.E. Machine learning in cybersecurity. *Scientific Interdisciplinary Research*, 2: 24-29. (In Russ)
9. Magzhanova A.T. Integration of information sources using cluster analysis according to the machine learning scheme without a teacher. *Theory and Practice of Modern Science*, 6 (24):1037-1040. (In Russ)
10. Maksyutin P.A., Shulzhenko S.N. Review of text classification methods using machine learning. *Engineering Bulletin of the Don*, 12 (96):1-9. (In Russ)
11. Zhilenkov A.A., Silkin A.A., Serebryakov M.Yu., Kolesova S.V. Comparative analysis of systems deep reinforcement learning and teacher-led learning systems. *Proceedings of Tula State University. Technical Sciences*, 10:109-112. (In Russ)
12. Stolyarov A.S., Rajabov T.R. The development of AI, deep and machine learning. *Theory and Practice of Modern Science*, 8 (38): 70-80. (In Russ)
13. Papusha S.I. Ontology and graph databases. *Problems of Economics and legal practice*, (3), pp. 268-272. (In Russ)
14. Dobrov B.V., Ivanov V.V., Lukashevich N.V., Solovyov V. D. Ontologies and thesauruses: models, tools, applications: textbook [Electronic resource] / B. V. Dobrov, V.V. Ivanov, N.V. Lukashevich, V.D. Solovyov. — 2nd ed. (electronic) — Electron, dan. and progr. (3 Mb.) — Moscow: Internet University of Information Technologies; Saratov: University Education, 2017. (In Russ)
15. Hekalo T.V. The study of personal meanings of physico-chemical objects by the method of semantic differential. *Questions of Psycholinguistics*, 2016:256-265. (In Russ)

Сведения об авторах:

Шаблия Владимир Олегович, аспирант; ne.404@mail.ru

Коноваленко Сергей Алесандрович, докторант, кандидат технических наук, доцент;

konovalenko_rcf@mail.ru

Орлов Егор Олегович, студент 4 курса; egor535553@mail.ru

Information about authors:

Vladimir O. Shablya, Postgraduate Student; ne.404@mail.ru

Sergey A. Konovalenko, Doctoral Student, Cand. Sci. (Eng), Assoc. Prof.; konovalenko_rcf@mail.ru

Egor O. Orlov, 4th year Student; egor535553@mail.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 21.05.2024.

Одобрена после рецензирования/ Revised 20.06.2024.

Принята в печать/Accepted for publication 09.10.2024

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 697.921.4



DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-4-171-178 Оригинальная статья /Original article

Анализ формирования воздушных потоков в сопловом клапане
Д.В. Абрамкина¹, А.О. Иванова¹, Д.Ф. Карпов², Х.М. Вафаева³, А.С. Воронов⁴

¹Московский государственный строительный университет,

¹129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 25, Россия,

² Вологодский государственный университет,

² 160000, г. Вологда, ул. Ленина, 15, Россия,

³ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,

³195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29 литера Б, Россия,

⁴ Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы,

⁴117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6, Россия

Резюме. Цель. Для проведения корректной оценки воздействия систем вентиляции на акустическую обстановку помещения необходимо определять длину вихревой зоны, формирующейся при прохождении воздушного потока через дросселирующие устройства. В статье рассматриваются результаты моделирования соплового клапана с изменяющимся проходным сечением в процессе его открытия и закрытия. **Метод.** Анализ сценариев формирования воздушного потока при различных положениях регулирующей диафрагмы производился с помощью метода вычислительной гидродинамики (CFD) в программном комплексе Ansys Fluent. **Результат.** При уменьшении площади проходного сечения наблюдается резкое локальное повышение скорости воздушного потока, а также формирование вихревых зон и обратных течений, возникающих вследствие эффекта эжекции. **Вывод.** Наличие сложных турбулентных потоков в вентиляционной сети приводит к повышению уровней звукового давления и шума, проникающему в обслуживаемое помещение. Выявленные значительные отклонения от максимальной рекомендуемой скорости в зависимости от сценария открытия клапана подчеркивают важность учета дросселирующих устройств при проведении акустических расчетов. Анализ длины участка стабилизации течения позволяет определить оптимальное месторасположение соплового клапана и исключить размыкание вихревой зоны при совместном взаимодействии местных сопротивлений (воздухораспределительных устройств, тройников, отводов и клапанов постоянного расхода воздуха). Для снижения риска возникновения повышенных шумов рекомендуется размещение соплового клапана на прямом участке воздуховода, длиной не менее одного калибра до и трех калибров после дросселирующего устройства.

Ключевые слова: шум, шумовые характеристики, ирисовый клапан, сопловой клапан, вихревая зона

Для цитирования: Д.В. Абрамкина, А.О. Иванова, Д.Ф. Карпов, Х.М. Вафаева, А.С. Воронов. Анализ формирования воздушных потоков в сопловом клапане. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2024; 51(4):171-178. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-4-171-178

Analysis of air flow formation in a nozzle valve
D.V. Abramkina¹, A.O. Ivanova¹, D.F. Karpov², Kh.M. Vafaeva³, A.S. Voronov⁴

¹ Moscow State University of Civil Engineering,

¹ Yaroslavskoe highway, 26, Moscow 129337, Russia,

² Vologda State University,

² 15 Lenin St., Vologda 160000, Russia,

³ Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University,

³ 29 letter B Polytechnique St., Saint-Petersburg 195251, Russia,

⁴ Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba,

⁴ 6 Miklukho-Maklaya St., Moscow 117198, Russia

Abstract. Objective. To accurately assess the impact of ventilation systems on the acoustic environment of a room, it is necessary to determine the length of the vortex zone that forms as the air flow passes through throttling devices. The article examines the results of modeling a nozzle valve with a variable cross-section during its opening and closing processes. **Method.** The analysis of airflow formation scenarios at various positions of the control diaphragm was performed using Computational Fluid Dynamics (CFD) in the Ansys Fluent software package. **Result.** As the cross-sectional flow area decreases, a sharp local increase in air flow velocity is observed, along with the formation of vortex zones and reverse flows resulting from the ejection effect. **Conclusion.** The presence of complex turbulent flows in the ventilation network leads to increased sound pressure levels and noise penetrating the serviced space. Significant deviations from the recommended maximum velocity, depending on the valve opening scenario, highlight the importance of considering throttling devices in acoustic calculations. Analyzing the length of the flow stabilization section enables optimal placement of the nozzle valve, preventing the vortex zone from breaking up due to the combined influence of local resistances (air distribution devices, tees, bends, and constant airflow valves). To reduce the risk of increased noise, it is recommended to position the nozzle valve on a straight duct section, with a length of at least one duct diameter before and three duct diameters after the throttling device.

Keywords: noise, noise characteristics, iris valve, nozzle valve, vortex zone

For citation: D.V. Abramkina, A.O. Ivanova, D.F. Karpov, Kh.M. Vafaeva, A.S. Voronov. Analysis of air flow formation in a nozzle valve. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2024; 51(4):171-178. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-4-171-178

Введение. Зачастую акустические расчеты, выполненные с использованием формул из справочных материалов, оказываются недостаточно точными, что приводит к необходимости моделирования воздушных потоков, проходящих через отдельные элементы вентиляционной сети. Моделирование учитывает конструктивные особенности различных клапанов, фасонных изделий и воздухораспределительных устройств. Ирисовый клапан, используемый для регулировки расхода воздуха, отличается особой конструкцией, представляющей собой множество радиально расположенных лопастей, которые могут сжиматься или расширяться, изменяя площадь поперечного сечения воздухопровода. Размещение регулирующих лепестков под углом в виде сопла позволяет достичь более плавного регулирования воздушного потока и широко применяется в системах, требующих точного контроля параметров воздуха.

При оценке эффективности работы ирисовых клапанов специалисты сталкиваются с рядом трудностей, связанных с их аэродинамическими и акустическими характеристиками. Одной из главных проблем является корректное определение сопротивления клапана при различных степенях его открытия, что имеет решающее значение для прогнозирования его влияния на расход воздуха и перепады давления в системе. В отличие от стандартных заслонок и дроссельных устройств, ирисовые клапаны с наклонными лопатками имеют сложную геометрию, которая затрудняет расчет аэродинамических коэффициентов без использования численного моделирования или испытаний [1]. Отсутствие достоверных данных в каталогах производителей по характеристикам клапанов при различных положениях створок дополнительно усложняет процесс проектирования [2]. Паспорта и протоколы испытаний далеко не всегда содержат полные и точные сведения, что приводит к искажению представлений о технических и акустических свойствах устройства. В результате это может вызвать неправильный подбор оборудования при проектировании и возникновение шума в процессе эксплуатации.

Особое внимание следует уделить конструктивным особенностям каждого типа регулирующего устройства. Например, при акустическом расчете таких устройств, как ирисовый или сопловой клапан, можно отметить частично закрытую диафрагму, где создаются зоны турбулентности и высокоскоростные вихревые потоки. Эти явления генери-

руют аэродинамический шум, интенсивность которого зависит от степени настройки клапана. Турбулентные зоны образуются вследствие неравномерного распределения потока, а возникающие вихри усиливают шум, создавая дополнительные акустические нагрузки на систему [3, 4]. Таким образом, конструкция и положение диафрагмы или створки дросселирующего устройства существенно влияют на общую шумовую обстановку в помещении [5-7]. Можно отметить, что развитие и применение методов компьютерного моделирования для регулирующих устройств является актуальной задачей. Современные подходы вычислительной гидродинамики позволяют исследовать поведение клапанов при различных режимах работы и повысить точность расчетов. Эти методы открывают возможности для оптимизации конструкции ирисовых клапанов и их применения в системах вентиляции, что особенно важно для создания энергоэффективных и малошумных инженерных систем [8-9].

Постановка задачи. Объектом исследования являются сопловые клапаны систем вентиляции. Предмет исследования – шум, генерируемый регулируемыми устройствами в вентиляционной сети. Целью исследования является определение длины вихревой зоны и определение зависимости уровня шума от скорости воздушного потока и степени открытия клапана при помощи инструментов компьютерного моделирования.

Для достижения этой цели требуется провести моделирование воздушных потоков, проходящих через частично закрытую диафрагму клапана, и оценить параметры, влияющие на формирование аэродинамического шума.

Методы исследования. Для проведения компьютерного моделирования была разработана 3D модель соплового клапана с регулирующими лопатками (Рис. 1)

В ходе исследования были проанализированы следующие сценарии: 1 — диафрагма в положении минимального открытия (площадь поперечного сечения отверстия для прохода воздуха $f_0 = 0,001 \text{ м}^2$), 2 — диафрагма на средней степени открытия ($f_0 = 0,004 \text{ м}^2$) и 3 — полностью открытая диафрагма ($f_0 = 0,012 \text{ м}^2$).

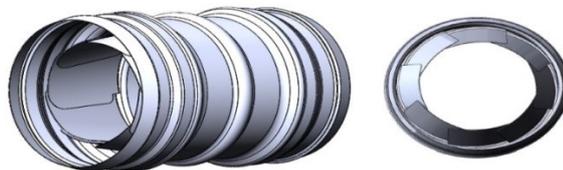


Рис. 1. Модель соплового клапана

Fig. 1. Model of ventilation nozzle damper

Математическое моделирование в данном исследовании проводится с использованием программного комплекса ANSYS Fluent. Этот комплекс позволяет выполнять анализ параметров воздушных потоков на основе метода вычислительной гидродинамики (CFD). В ANSYS Fluent моделирование воздушных потоков осуществляется с помощью численного решения уравнений Навье-Стокса, которые описывают поведение жидкости и газа [10-14].

Изначально были заданы входные параметры, такие как расход, угол открытия диафрагмы и скорость движения набегающего воздушного потока, они задаются для воспроизведения различных режимов работы соплового клапана. Пространство внутри клапана делится на сетку (домен), состоящую из небольших элементов, на которых решаются уравнения движения. Для более точного описания турбулентных зон и вихрей, возникающих при частичном открытии клапана, применяются турбулентные модели (k-ε модель), которые позволяют учитывать влияние турбулентности на поведение воздушного потока [15].

Обсуждение результатов. На основании полученных данных компьютерного моделирования можно проанализировать распределение скорости воздушного потока и уровни акустического давления при разной степени открытия клапана. Изначально были

заданы следующие условия: расход воздуха составил $60 \text{ м}^3/\text{ч}$, средняя скорость потока воздуха $1,4 \text{ м/с}$, проходное сечение клапана с диаметром 125 мм .

На рис. 2 представлены результаты моделирования скорости воздушного потока при прохождении соплового регулирующего устройства при 1 сценарии. За счет сужения поперечного сечения происходит локальное увеличение скорости воздуха, в разы превышающее рекомендуемые значения для жилых и общественных зданий согласно СП 60.13330.2020 «Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха».

За регулирующим устройством формируется замкнутая турбулентная зона, являющаяся источником повышенного шума. При длине прямого участка за сопловым клапаном, соответствующей трем калибрам, происходит смыкание ядра струи, последующее снижение скорости и выравнивание воздушного потока. Влияние эффекта эжекции приводит к формированию циркуляционных течений, отмеченных фиолетовым цветом на рис. 2.

Размещение фасонных элементов (тройников, отводов), клапанов постоянного расхода воздуха и воздухораспределительных устройств в пределах вихревой зоны приводит к ее размыканию и увеличению уровней звукового давления. Появление вторичных шумов вследствие формирования турбулентных завихрений в вентиляционной сети может значительно снизить эффективность работы шумоглушителей [16].

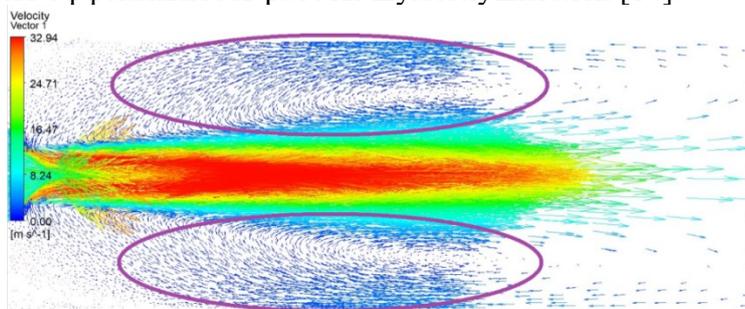


Рис. 2. Формирование воздушных потоков при минимальном открытии диафрагмы на сопловом клапане (сценарий 1)

Fig. 2. Formation of air flows with minimum opening of the diaphragm on the nozzle valve (scenario 1)

Сопловой клапан имеет разные настройки для точного регулирования потока воздуха. Сравним результаты при среднем (промежуточном) открытии диафрагмы (сценарий 2). Максимальная скорость воздушного потока за дросселирующим устройством составила $5,25 \text{ м/с}$ (рис. 3). Длина смыкания вихревой зоны также соответствует трем калибрам.

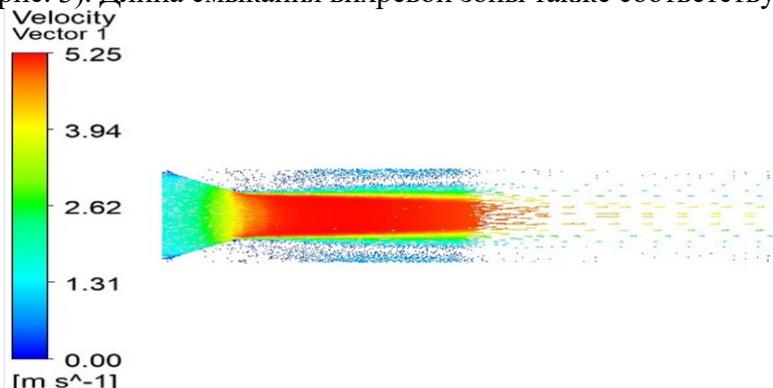


Рис. 3. Формирование воздушных потоков при среднем открытии диафрагмы на сопловом клапане (сценарий 2)

Fig. 3. Formation of air flows with medium opening diaphragm on the nozzle valve (scenario 2)

Последний вариант – полное открытие лепесткового затвора соплового клапана (рис. 4).

Аналогично предыдущим сценариям, наблюдается локальное повышение скорости потока. Небольшие застойные зоны возникают в пристеночной области вентиляци-

онного канала, в результате срыва потока при прохождении лопаток. Отдельно стоит отметить увеличение скорости потока до соплового клапана, что может приводить к шуму в случае близкого расположения местных сопротивлений до дросселирующего устройства.

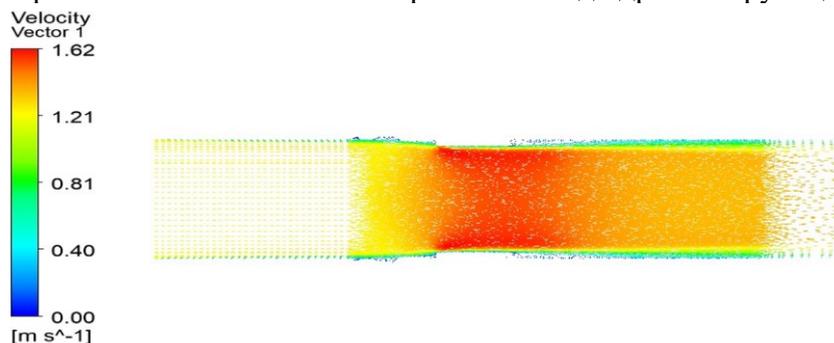


Рис. 4. Формирование воздушных потоков при полном открытии диафрагмы на сопловом клапане (сценарий 3)

Fig. 4. Formation of air flows with full opening of the diaphragm on the nozzle valve (scenario 3)

Вывод. При компьютерном моделировании воздушных потоков в сопловом клапане самым неблагоприятным сценарием являлось минимально открытая область диафрагмы (1 сценарий). При наличии сложной разветвленной вентиляционной трассы ближайшие ответвления к приточной установке попадают в особую зону риска. Именно эта часть системы будет максимально подвержена повышенному шуму, распространяющемуся от вентилятора по воздуховодной сети.

Для осуществления аэродинамической увязки системы при проведении пусконаладочных работ ближайшее ответвление будет характеризоваться наибольшей степенью закрытия дросселирующего устройства. Размещение воздухораспределителя в зоне стабилизации воздушного потока после соплового клапана приведет к неблагоприятной акустической обстановке в помещении.

Было выявлено, что при уменьшении проходного сечения во время закрытия створок диафрагмы при сценарии 1 и 2 разница в максимальной скорости составила 15,9 %. Среднее процентное отклонение 2 и 1 сценария равна 30,9% соответственно. Эта разница подчеркивает необходимость учета степени закрытия регулирующего устройства при проведении акустических расчетов.

Современные методы физического и математического моделирования [17-24], в том числе с использованием различных моделей турбулентности [25-27] могут обеспечить точный прогноз уровней шумового воздействия. Внедрение новых материалов и конструкций вентиляционных устройств приводит к необходимости проведения комплексных акустических исследований [28].

Библиографический список:

1. Лешко М.Ю. К вопросу шумообразования дросселирующих устройств. Вестник МГСУ. 2011. № 3. С. 82–86.
2. Lan L., Sun Y., Wyon D.P., Wargocki P. Pilot study of the effects of ventilation and ventilation noise on sleep quality in the young and elderly. *Indoor air*. Vol. 31 (4). DOI: 10.1111/ina.12861
3. Meira L.S., Souza F. Numerical investigation of the flow-induced noise in a turbulent flow inside an HVAC duct. 12th Spring School on Transition and Turbulence. 2020. DOI: 10.26678/ABCM.EPTT2020.EPT20-0063
4. Geyer T. F., Lucius A., Schrödter M., Schneider M., Sarradj E. Reduction of turbulence interaction noise through airfoils with perforated leading edges. *Acta Acustica united with Acustica*. 2019. Vol. 105. Pp. 109-122. DOI: 10.3813/AAA.919292
5. Kopania J.M., Grzegorz B., Gaj P., Wójciak K. Acoustical parameters of the different fixing of blade ventilation damper into the duct. 10th Convention of the European Acoustics Association Forum Acusticum 2023. 2023. Pp. 4575-4579. DOI: 10.61782/fa.2023.1192

6. Kopania J.M., Grzegorz B., Gaj P., Wójciak K. Aeroacoustical study of the serrated ventilation dampers. *Vibrations in Physical Systems*. 2022. Vol. 3 (33). 2022313. DOI: 10.21008/j.0860-6897.2022.3.13
7. Skorik T., Galkina N., Glazunova E. Verification of the ventilation dampers' aerodynamic characteristics. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 913. 042043. DOI: 10.1088/1757-899X/913/4/042043
8. Nering K. Perception of Structure-Borne Sound in Buildings in Context of Vibration Comfort of Human in the Buildings. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 2020. Vol. 960. No. 022033. DOI: 10.1088/1757-899X/960/2/022033
9. Kopania J. M., Bogusławski G., Gaj P. Wójciak K. Acoustical parameters of the different fixing of blade ventilation damper into the duct. 10th Convention of the European Acoustics Association Turin, Italy. 2024. Pp. 4575–4579. DOI: 10.61782/fa.2023.1192
10. Kapre A.V., Dodia Y. Flow analysis of butterfly valve using CFD. *IJRET: International Journal of Research in Engineering and Technology*. 2015. Vol. 4 (11). Pp. 95-99.
11. Millers R., Pelite U. Survey of control characteristics of circular air dampers in variable air volume ventilation systems. *Energy Procedia*. 2016. Vol. 96. Pp. 296-300. DOI: 10.1016/j.egypro.2016.09.152.
12. Malet J., Radosavljevic M., Mbaye M., Costa D., Wiese J., Gehin E. Flow characterization of various singularities in a real-scale ventilation network with rectangular ducts. *Building and Environment*. 2022. Vol. 222. DOI: 10.1016/j.buildenv.2022.109223
13. Shihao W., Ran G., Hongming G., Haimeng L., Meng W., Sikai Z., Angui L. Air damper with Controlling Capacity Unrelated to duct system resistance. *Journal of Building Engineering*. 2021. Vol. 43. DOI: 10.1016/j.job.2021.102388.
14. Busu N.A., Isa M.A., Hariri A., Hussein M. Air damper effect on temperature and airflow distribution in enhancing thermal comfort performance. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*. 2022. Vol. 100 (1). Pp. 152-164. DOI: 10.37934/arfmts.100.1.152164
15. Rasuo B., Dinulovic M., Trninc M., et.al. A study of aerodynamic noise in air duct systems with turning vanes. *FME Transaction*. 2021. Vol. 49(2). Pp. 308-314. DOI: 10.5937/fme2102308R
16. Wang H., Zhang R., Luo W. Investigation on characteristics of secondary noise for the duct. *Xibei Gongye Daxue Xuebao/Journal of Northwestern Polytechnical University*. 2017. Vol. 35(6). Pp.998-1004
17. Абрамкина, Д.В. Сравнительный анализ методик акустического расчета дросселирующих устройств / Д.В. Абрамкина, А.О. Иванова, Д.Ф. Карпов, М.В. Павлов, Х.М. Вафаева // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2024. – Т. 51. – № 3. – С. 172–179. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2024-51-3-172-179>.
18. Borovkov, Alexey & Vafaeva, Khristina Maksudovna & Vatin, Nikolai & Ponyaeva, Irina. (2024). Synergistic Integration of Digital Twins and Neural Networks for Advancing Optimization in the Construction Industry: A Comprehensive Review. *Construction Materials and Products*. 7. <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2024-7-4-7>.
19. Гизатуллин, З.М. Физическое моделирование помехоустойчивости электронных средств при электромагнитном воздействии промышленных макроисточников / З.М. Гизатуллин, М.Г. Нуриев, Р.М. Гизатуллин // Радиотехника и электроника. – 2018. – Т. 63, № 1. – С. 97–102. – DOI 10.7868/S0033849417010144. – EDN YNINET.
20. Гизатуллин, З.М. Физическое моделирование электромагнитных помех в электронных средствах при воздействии электромагнитных полей высоковольтных линий электропередачи / З.М. Гизатуллин, М.Г. Нуриев, Р.М. Гизатуллин // Электротехника. – 2018. – № 5. – С. 45-48. – EDN YWNYGO.
21. Простая методика исследования электромагнитного излучения от электронных средств / З.М. Гизатуллин, М.Г. Нуриев, М.С. Шкиндеров, Ф.Р. Назметдинов // Журнал радиоэлектроники. – 2016. – № 9. – С. 7. – EDN XAAFVF.
22. Гибадуллин, Р.Ф. Анализ параметров промышленных сетей с применением нейросетевой обработки / Р.Ф. Гибадуллин, Д.В. Лекомцев, М.Ю. Перухин // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2020. – № 1. – С. 80-87. – DOI 10.14357/20718594200108. – EDN EKNKRS.
23. Разработка аппаратно-программного модуля обнаружения объектов для встраиваемых систем / Р.Ф. Гибадуллин, И.Н. Смирнов, Н.В. Хевронин [и др.]//Вестник Технологического университета. – 2018. – Т. 21, № 6. – С. 118-122. – EDN XUALTF.
24. Гибадуллин, Р.Ф. Построение сети на основе технологии GPON / Р.Ф. Гибадуллин, А.П. Никитин, М.Ю. Перухин // Вестник Технологического университета. – 2017. – Т. 20, № 5. – С. 104-108. – EDN YNEHLV.
25. Trninc M., Rasuo B., Dinulovic M. Air duct modification towards outlet pressure drop and vibration level reduction. 2020. *Tehnika*. Vol. 75(4). Pp. 457-466. DOI: 10.5937/tehnika2004457T
26. Nering K., Nering K. Validation of Modified Algebraic Model during Transitional Flow in HVAC Duct. *Energies*. 2021. Vol. 14. No 3975 DOI: 10.3390/en14133975
27. Lucic M. Design and CFD simulation of the exhaust manifold of the Formula Student vehicle. *International Scientific Journal "Machines. Technologies. Materials"*. 2023. Iss. 2. Pp. 54-57

28. Zekic S., Gomez-Agustina L., Aygun H., Chaer I. Measurement methods of acoustics properties for alternative ventilation ducts. Inter Noise 2020. Seoul 23 - 26 Aug 2020 International Institute of Noise Control Engineering.

References:

1. Leshko M.Yu. On the issue of noise generation of throttling devices. *Vestnik MGSU*. 2011;3:82–86. (In Russ)
2. Lan L., Sun Yu., Vayon D.P., Wargotsky P. Pilot study of the effect of ventilation and ventilation noise on sleep quality in young and elderly people. *Indoor Air*. 31(4). DOI: 10.1111/ina.12861
3. Meira L.S., Souza F. Numerical study of flow-generated noise in a turbulent flow inside an HVAC duct. 12th Spring School on Transition Period and Turbulence. 2020. DOI: 10.26678/ABCMEPTT2020.EPT20-0063
4. Geyer TF, Lucius A, Schroedter M, Schneider M, Sarraj E. Reduction of turbulent interaction noise using airfoils with perforated leading edges. *Acta Acustica merged with Acustica*. 2019;105:109-122. DOI: 10.3813/AAA.919292
5. Kopania JM, Grzegorz B, Gaj P, Wujczak K. Acoustic parameters of different mountings of a vane ventilation damper in a duct. 10th Congress of the European Acoustics Association Forum Acusticum 2023. 2023; 4575-4579. DOI: 10.61782/fa.2023.1192
6. Kopania J.M., Grzegorz B., Gaj P., Wujczak K. Aeroacoustic study of toothed ventilation dampers. *Vibrations in Physical Systems*. 2022; 3 (33): 2022313 . DOI: 10.21008/j.0860-6897.2022.3.13
7. Skorik T., Galkina N., Glazunova E. Testing the aerodynamic characteristics of ventilation dampers. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;913:042043. DOI: 10.1088/1757-899X/913/4/042043
8. Nehring K. Perception of structure-borne sound in buildings in the context of human vibration comfort in buildings. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 960:022033. DOI: 10.1088/1757-899X/960/2/022033
9. Kopania J.M., Boguslavsky G., Gaj P., Wujczak K. Acoustic parameters of different duct mountings of vane ventilation dampers. *10th Congress of the European Acoustics Association Turin, Italy*. 2024: 4575–4579. DOI: 10.61782/fa.2023.1192
10. Kapre A.V., Dodia Y. Flow Analysis of a Rotary Damper Using Computational Fluid Dynamics. *IJRET: International Journal of Research in Engineering and Technology*. 2015; 4(11): 95-99 .
11. Millers R., Pelite U. A Review of Control Characteristics of Circular Air Dampers in Variable Air Volume Ventilation Systems. *Energy Procedia*. 2016; 96: 296-300. DOI: 10.1016/j.egypro. 2016.09.152.
12. Malet J., Radosavljevic M., Mbaye M., Costa D., Wiese J., Gehin E. Flow characterization of different features in a real ventilation network with rectangular ducts. *Building and Environment*. 2022;222. DOI: 10.1016/j.buildenv.2022.109223
13. Shihao W., Ran G., Hongming G., Haimeng L., Meng W., Sikai Z., Angui L. *Air damper with control capacity not related to the duct system resistance*. *Journal of Structural Engineering*. 2021;43. DOI: 10.1016/j.jobe.2021.102388.
14. Busu N.A., Isa M.A., Hariri A., Hussain M. Effect of Air Damper on Temperature and Airflow Distribution to Enhance Thermal Comfort Performance. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*. 2022;100(1):152-164. DOI: 10.37934/arfmts.100.1.152164
15. Rasuo B., Dinulovic M., Trinic M., et.al. Investigation of Aerodynamic Noise in Turning Vane Duct Systems. *FME Transaction*. 2021;49(2):308-314. DOI: 10.5937/fme2102308R
16. Wang H., Zhang R., Luo W. Study on Secondary Noise Characteristics for Duct. Xibei Gongge Daxue Xuebao. *Journal of the North-West Polytechnic University*. 2017;35(6):998-1004
17. Abramkina, D.V. Comparative analysis of the methodology for acoustic calculation of throttling devices / D.V. Abramkina, A.O. Ivanova, D.F. Karpov, M.V. Pavlov, H.M. Vafaeva. *Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Sciences*. 2024;51(3):172 - 179. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2024-51-3-172-179>. (In Russ)
18. Borovkov Alexey and Vafaeva, Kristina Maksudovna and Vatin, Nikolay and Ponyaeva Irina. (2024). Synergistic Integration of Digital Twins and Neural Networks to Advance Optimization in the Construction Industry: A Comprehensive Review. *Construction Materials and Products*. 7. <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2024-7-4-7>.
19. Gizatullin, Z.M. Physical Modeling of Noise Immunity of Electronic Equipment under Electromagnetic Exposure of Industrial Macrosources / Z.M. Gizatullin, M.G. Nuriev, R.M. Gizatullin. *Radio Engineering and Electronics*. 2018;63(1):97-102. DOI 10.7868/S0033849417010144. - EDN INGNET. (In Russ)
20. Gizatullin Z.M. Physical modeling of electromagnetic effects in electronic devices under the influence of electromagnetic fields of high-voltage power lines / Z.M. Gizatullin, M.G. Nuriev, R.M. Gizatullin // *Electrical engineering*. 2018; 5: 45-48. - EDN YVNIIGO. (In Russ)

21. A simple technique for studying electromagnetic radiation from electronic devices / Z.M. Gizatullin, M.G. Nuriev, M.S. Shkinderov, F.R. Nazmetdinov. *Journal of Radio Electronics*. 2016;9:7. - EDN XAAFVF. (In Russ)
22. Gibadullin R.F. Analysis of industrial network parameters using neural network processing. R.F. Gibadullin D.V. Lekomtsev, M.Yu. Peruhin. *Artificial Intelligence and Decision Making*. 2020;1:80-87. - DOI 10.14357/20718594200108. - EDN EKNKRS. (In Russ)
23. Development of a hardware and software module for object detection for embedded systems / R.F. Gibadullin I.N. Smirnov, N.V. Hevronin [et al.] *Bulletin of the Technological University*. 2018; 21(6): 118-122. - EDN XUALTF. (In Russ)
24. Gibadullin, R.F. Building a network based on GPON technology / R.F. Gibadullin, A.P. Nikitin, M.Yu. Peruhin. *Bulletin of the Technological University*. 2017; 20(5.): 104-108. - EDN YHEHLV. (In Russ)
25. Trinic M., Rasuo B., Dinulovic M. Air duct modification towards outlet pressure drop and vibration level reduction. *Tehnika*. 2020;75(4): 457-466. DOI: 10.5937/Tehnika 2004457T
26. Nering K., Nering K. Validation of Modified Algebraic Model during Transitional Flow in HVAC Duct. *Energies*. 2021; 14: 3975 DOI: 10.3390/en14133975
27. Lucic M. Design and CFD simulation of the exhaust manifold of the Formula Student vehicle. *International Scientific Journal "Machines. Technologies. Materials"*. 2023; 2: 54-57
28. Zekic S., Gomez-Agustina L., Aygun H., Chaer I. Measurement methods of acoustics properties for alternative ventilation ducts. *Inter Noise 2020*. Seoul 23 - 26 Aug 2020 International Institute of Noise Control Engineering.

Сведения об авторах:

Абрамкина Дарья Викторовна, кандидат технических наук, доцент, доцент, кафедра теплогазоснабжения и вентиляции; dabramkina@ya.ru; ORCID 0000-0001-8635-1669

Иванова Ангелина Олеговна, аспирант, кафедра теплогазоснабжения и вентиляции; ivanova.angeli@yandex.ru; ORCID 0000-0003-4937-9843

Карпов Денис Федорович, старший преподаватель, кафедра теплогазоснабжения; karpovdf@vogu35.ru; ORCID 0000-0002-3522-9302

Вафаева Христина Максудовна, инженер-исследователь, лаборатория самовосстанавливающихся конструкционных материалов; vafaeva.khm@gmail.com; ORCID 0000-0002-7422-5494

Воронов Александр Сергеевич, аспирант; 1142220725@rudn.ru

Information about authors:

Daria V. Abramkina, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Assoc. Prof., Department of Ventilation and Heat and Gas Supply; dabramkina@ya.ru; ORCID 0000-0001-8635-1669

Angelina O. Ivanova, Postgraduate Student, Department of Ventilation and Heat and Gas Supply; ivanova.angeli@yandex.ru; ORCID 0000-0003-4937-9843

Denis F. Karpov, Senior Lecturer, Department of Heat, Gas and Water Supply; karpovdf@vogu35.ru; ORCID 0000-0002-3522-9302

Khristina M. Vafaeva, Research Engineer, Laboratory of Self-Healing Structural Materials; vafaeva.khm@gmail.com; ORCID 0000-0002-7422-5494

Alexander S. Voronov, Postgraduate student; 1142220725@rudn.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов/The authors declare that there are no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/ Received 01.09.2024.

Одобрена после рецензирования / Revided 30.09.2024.

Принята в печать /Accepted for publication 15.10.2024.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 624.044

DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-4-179-190



Оригинальная статья /Original article

**К вопросу о формировании свойств реставрационных составов на основе
воздушных гидравлических вяжущих веществ**

П.Д. Батаева¹, З.З. Аларханова¹, Х.М. Батаева¹, А.Д. Батаев²

¹Комплексный научно-исследовательский институт имени Х.И. Ибрагимова РАН,
¹364051, г. Грозный, В. Алиева (Старопромысловское) шоссе, 21А, Россия,

²Грозненский государственный нефтяной технический университет,
²364051, г. Грозный, пр. им. Х.А. Исаева, 100, Россия

Резюме. Цель. В настоящем исследовании выполнен обзор органических добавок, органических и неорганических вяжущих веществ, включая воздушные и гидравлические известковые вяжущие вещества. Рассмотрен тепломассообмен в процессах декарбонизации и карбонизации воздушных и гидравлических известковых вяжущих веществ и ремонтно-реставрационных составов на их основе, знание которого необходимо для проектирования оборудования и технологических процессов производства минеральных вяжущих веществ, а также технологий и составов для ремонтно-реставрационных работ. **Метод.** Реакции диссоциации и декарбонизации приведены как обратимые реакции, рассчитаны: фронт разложения, границы разложения известняка, время диссоциации и скорость реакции диссоциации. Для получения полной информации массообмена при декарбонизации известняка принят во внимание и теплообмен, что усложняет задачу в связи с неизотермичностью температурного поля, которая сказывается на различии скоростей реакции декарбонизации. **Результат.** Приведено решение задачи, выполненное Гельдом и Ивановым, и дифференциальное уравнение теплопроводности Фурье. Рассмотрены типы твердения извести: карбонатное, гидратное и гидросиликатное. Карбонатное твердение извести представлено как процесс затвердевания, длительный по времени. Выявлена зависимость интенсивности карбонизации от содержания воды и влажности. **Вывод.** Установлена научная и практическая ценность нового научного направления: «Исследование воздушных и гидравлических известковых вяжущих веществ и разработка ремонтно-реставрационных составов на их основе». Разработаны новые составы для ремонта, восстановления и реставрации памятников истории и культуры, отвечающие предъявляемым ремонтно-реставрационным требованиям.

Ключевые слова: тепломассообмен, диссоциация, карбонизация, декарбонизация, минеральное вяжущее, воздушная и гидравлическая известь, негашеная известь, меласса, ремонтно-реставрационный состав, известняк, гидроксид кальция, углекислый газ

Для цитирования: П.Д. Батаева, З.З. Аларханова, Х.М. Батаева, А.Д. Батаев. Тепломассообмен в процессах декарбонизации и карбонизации воздушных и гидравлических известковых вяжущих веществ и ремонтно-реставрационных составов на их основе. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2024;51(4):179-190. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-4-179-190

**On the issue of forming the properties of restoration compositions based on air
and hydraulic binders**

P.D. Bataeva¹, Z.Z. Alarhanova¹, Kh. M. Bataeva¹, A.D. Bataev²

¹Kh. Ibragimov Complex Institute of the Russian Academy of Sciences,
¹21A V. Aliyeva (Staropromyslovskoe) highway, Grozny 364051, Russia,

²Grozny State Oil Technical University named after M.D. Millionshikov,
²100 Kh.A. Isaev Ave., Grozny 364051, Russia

Abstract. Objective. This study provides a review of organic additives, organic and inorganic binders, including air and hydraulic lime binders. Heat and mass transfer in the processes of decarbonization and carbonization of air and hydraulic lime binders and repair and restoration compositions based on them is considered, knowledge of which is necessary for the design of equipment and technological processes for the production of mineral binders, as well as technologies and compositions for repair and restoration work. **Method.** The dissociation and decarbonization reactions are given as reversible reactions, the decomposition front, the boundaries of limestone decomposition, the dissociation time and the dissociation reaction rate are calculated. To obtain complete information on mass transfer during the decarbonization of limestone, heat transfer is also taken into account, which complicates the task due to the non-isothermal temperature field, which affects the difference in the rates of the decarbonization reaction. **Result.** The solution of the problem, carried out by Held and Ivanov, and the Fourier differential equation of thermal conductivity are given. The types of lime hardening are considered: carbonate, hydrate and hydrosilicate. Carbonate hardening of lime is presented as a hardening process that takes a long time. The mechanism of carbonate hardening has been studied. The dependence of carbonization intensity on water content and humidity was revealed. **Conclusion.** The scientific and practical value of a new scientific direction has been established: “Research of air and hydraulic lime binders and the development of repair and restoration compositions based on them.” As a result of the research, new compositions have been developed for the repair, restoration and restoration of historical and cultural monuments that meet the repair and restoration requirements.

Key words: heat and mass transfer, dissociation, carbonization, decarbonization, mineral binder, air lime, hydraulic lime, quicklime, molasses, repair and restoration composition, limestone, calcium hydroxide, carbon dioxide

For citation: P.D. Bataeva, Z.Z. Alarkhanova, Kh.M. Bataeva, A.D. Bataev. On the issue of forming the properties of restoration compositions based on air and hydraulic binders. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2024; 51(4):179-190. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-4-179-190

Введение. На Юге России сосредоточено значительное количество объектов культурного наследия (ОКН), требующие ремонта, восстановления и реставрации. Для производства ремонтно-восстановительных и реставрационных работ необходимы специальные ремонтно-реставрационные составы, отвечающие специфическим реставрационным требованиям. В основе этих составов в основном лежат органические вяжущие вещества и неорганические вяжущие вещества, включая воздушные и гидравлические известковые вяжущие вещества.

Постановка задачи. Для оптимизации технологии производства ремонтно-реставрационных работ необходимо изучение тепломассообмена в процессах декарбонизации и карбонизации воздушных и гидравлических известковых вяжущих веществ и ремонтно-реставрационных составов на их основе.

Методы исследования. Информационную базу научного исследования составили данные поисковых исследований вяжущих веществ и материалов. Методологическую основу исследования составляют методы физико-химического анализа, системные методы и систематизация теоретического и практического материала. В работе использованы современные методы физико-механических испытаний материалов и конструкций, включающие разрушающие и неразрушающие методы контроля качества, а также современный математический аппарат обобщения и обработки экспериментальных и статистических данных.

Обсуждение результатов. Существует множество разнообразных вяжущих веществ, однако при ремонте и восстановлении объектов культурного наследия (ОКН) применяется лишь часть из них. Такие вяжущие вещества относят к ремонтно-

реставрационным. А они, в свою очередь, подразделяются на минеральные вяжущие вещества и органические вяжущие вещества [3-7]. Минеральные (неорганические) вяжущие вещества – это порошковидные материалы, затвердевающие и образующие камень при смешивании с водой или растворами некоторых солей. Некоторые минеральные вяжущие твердеют образованием гидратных новообразований при затворении вяжущего вещества водой, а некоторые твердеют вследствие взаимодействия с углекислотой воздуха и одновременной перекристаллизации гидрата окиси кальция [4].

Неорганические вяжущие используются в основном в смеси с водой и наполнителями и заполнителями, которые представляют собой органические и неорганические материалы разных размеров: отдельные зерна, куски, волокна и др. В некоторых случаях неорганические вяжущие используют в чистом виде без наполнителей и заполнителей. Каждая из этих групп обладает специфическими свойствами: органические материалы не выдерживают высоких температур, минеральные, наоборот не горят, но плохо работают на растяжение. Неорганические вяжущие вещества в зависимости от их основных свойств подразделяются на три основные группы: воздушные, гидравлические и кислотостойкие (рис. 1).

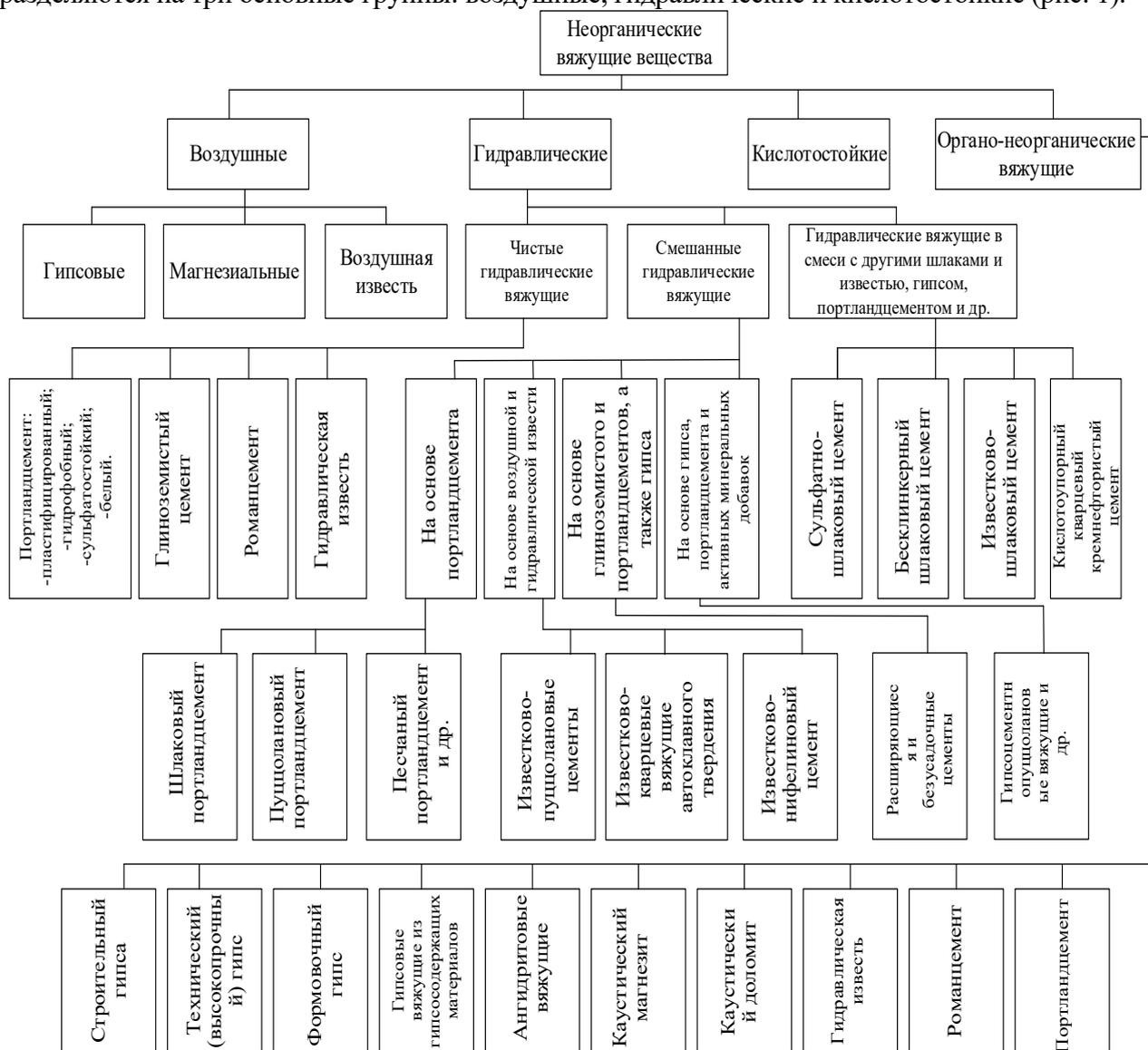


Рис. 1. Классификация неорганических вяжущих веществ
Fig. 1. Classification of inorganic binders

Воздушные вяжущие вещества при затворении водой твердеют и сохраняют прочность лишь в воздушной среде и могут быть использованы в качестве компонентов

в составе для ремонта и реставрации памятников архитектуры, истории и культуры с учетом обстоятельства, что при систематическом увлажнении бетоны, изделия и конструкции на воздушных вяжущих теряют прочность и разрушаются. К ним относятся гипсовые вяжущие, строительная воздушная известь, магнезиальные вяжущие и прочие [5].

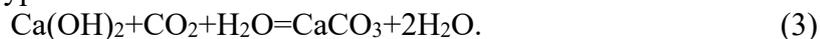
Рассмотрим строительную воздушную известь. Воздушная известь (CaO) – вяжущее вещество, получаемое обжигом при температуре 700-1100°C кальциево-магниевого карбонатных горных пород, содержащих не более 6-8 % глинистых и песчаных примесей и который состоит в большей части из оксида кальция. В результате обжига из известняка улетучивается углекислый газ, а он составляет до 44% его массы, из-за чего объем продукта уменьшается на 10%. Реакцию обжига можно записать в следующем виде:



Гашение извести происходит по реакции:

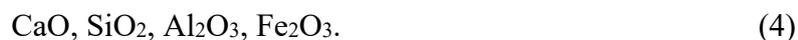


Твердение извести может происходить только в воздушно-сухих условиях и может быть представлено следующим уравнением:



Гидравлические вяжущие вещества после гидратации и предварительного твердения на воздухе способны твердеть в последующем в воздушной и водной средах, поэтому их используют в производстве разнообразных изделий, конструкций и полуфабрикатов, предназначенных к эксплуатации как в воздушной, так и в водной средах [6].

Из гидравлических вяжущих веществ для ремонтных нужд приемлемы только гидравлические извести, а остальные современные вяжущие не удовлетворяют требованиям к реставрационным составам. Такие вяжущие более сложные по своему составу. Они состоят из нескольких соединений:



Из группы гидравлических для ремонтно-реставрационных нужд могут быть использованы смешанные вяжущие, получаемые смешением чистых вяжущих друг с другом, а также с активными органическими и неорганическими добавками.

Эти вяжущие выделены в отдельную группу: органо-неорганические вяжущие вещества (рис. 1), которые удовлетворяют предъявляемым требованиям и могут быть использованы в качестве вяжущих компонентов при проектировании ремонтных составов. В эту группу можно отнести вяжущие на основе воздушной и гидравлической извести, строительного и технического гипса, ангидрита, известково-пуццоланового, известково-кварцевого и известково-нефелинового вяжущих [7].

Чистые гидравлические вяжущие, не содержащие или содержащие не более 10-15% добавок, не удовлетворяют ремонтным и реставрационным требованиям, за исключением белого цемента и гидравлической извести. По своему составу белый цемент схож с гидравлической известью, поэтому в порядке исключения может быть использован для приготовления ремонтного состава [5].

Необходимо дополнительно исследовать гидравлические вяжущие вещества, получаемые смешением активных и неактивных зол и им подобных компонентов с активаторами твердения: гидратной известью, гидравлической известью, гипсом, ангидритовым вяжущим, каустическим магнезитом, каустическим доломитом и др., на предмет их пригодности для ремонтно-реставрационных нужд [6].

В вяжущие вещества, а также в ремонтные бетоны и растворы, в определенных условиях, вводят различные добавки, которые представлены на рис. 2.

Из множества добавок в вяжущие вещества, бетоны и растворы для ремонтно-реставрационных нужд приемлемы только органические (казеиновые) добавки, такие как молоко, творог, простокваша и др.

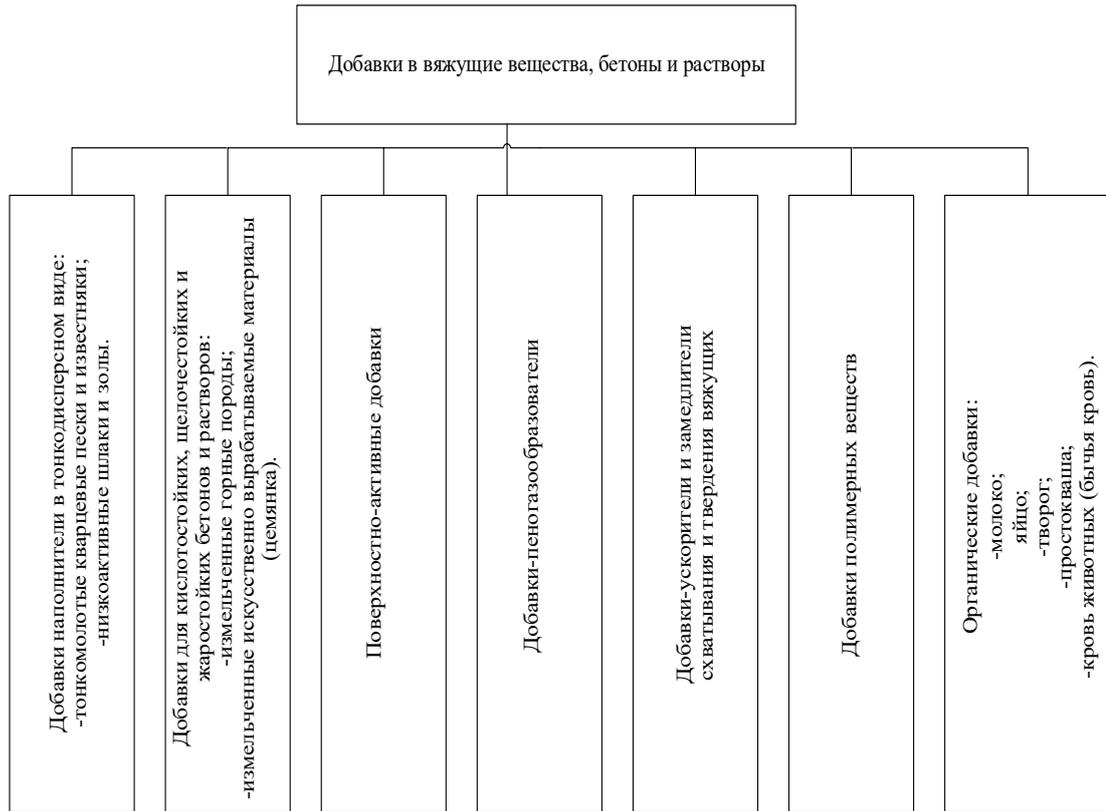


Рис. 2. Классификация добавок в вяжущие вещества, бетоны и растворы

Fig. 2. Classification of additives in binders, concretes and solutions

Обжиг известняка является основной технологической операцией, при которой происходит полное разложение CaCO_3 и $\text{MgCO}_3 \cdot \text{CaCO}_3$ на CaO , MgO с выделением углекислого газа CO_2 [5, 8, 10]. Реакция диссоциации и декарбонизации CaCO_3 имеет следующий вид:



Реакция диссоциации CaCO_3 обратимая реакция. При решении прикладной задачи – обжиг известняка, возникает потребность оценки развития явления декарбонизации: фронта разложения, границы разложения $\text{CaO} - \text{CaCO}_3$, времени диссоциации и др.

По истечении некоторого промежутка времени Δt в обжигаемом известняке формируются две зоны: наружная зона CaO ; внутренняя зона CaCO_3 . При возникновении зоны CaO происходит диффузия углекислого газа CO_2 через этот слой до тех пор, пока не произойдет диссоциация CaCO_3 . Скорость реакции диссоциации CaCO_3 (v) равна скорости образования CO_2 (v_1) и диффузии CO_2 (v_2) через зону CO_2 [10], т.е.:

$$v = v_1 = v_2$$

Следовательно,

$$\left. \begin{aligned} v_1 &= k \cdot S (1 - P/p_0) = k_1 (4\pi r^2/p_0)(p_0 - P) \\ v_2 &= -4\pi r^2 D \cdot dp/dr \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где $k = k_0 \exp[-E/(RT)]$ - константа скорости прямой реакции;

$S = 4\pi r^2$ - поверхность фронта реакции;

p_0 - упругость декарбонизации CaCO_3 при заданной температуре t ;

P - давление CO_2 на поверхность фронта реакции;

D - коэффициент диффузии углекислого газа (CO_2) через зону оксида кальция (CaO);

r - переменный радиус ядра CaCO_3 .

В результате получаем:

$$P - p = \frac{v_2}{4\pi D} (R^{-1} - r^{-1}), \quad (7)$$

Выразив из (6) p и подставив его в (5) для v_1 , после небольших преобразований получим

$$v_1 = 4\pi r^2 R k_1 (p_0 - P) / [p_0 DR + r k_1 (R - r)], \quad (8)$$

Выражение (8) определяет соотношение характеристик процесса, при которых обеспечивается установившийся режим декарбонизации CaCO_3 .

Скорость реакции (6)

$$dr/d\tau \quad (9)$$

связана с массой известняка G и временем τ .

Для этого необходимо учесть, что

$$v = (dG/d\tau) = 84\pi r^2 d_r/d\tau, \quad (10)$$

Из (10) следует

$$dr/d\tau = v / (4\pi r^2 \delta), \quad (11)$$

С учетом (8)

$$dr/d\tau = R \cdot k_1 \cdot D (p_0 - P) / [p_0 DR \delta + r k_1 \delta (R - r)]. \quad (12)$$

Разделив переменные и проинтегрировав (12) в пределах $R-r$ и $0 - \tau$, получаем зависимость для определения положения фронта реакции от времени (τ):

$$\tau = \delta \cdot [R^3 - r^3 / (3DR) - R^2 - r^2 / (2D) - (p_0/k_1) (R - r)] (p_0 - P)^{-1}, \quad (13)$$

Время полной декарбонизации CaCO_3 определяется исчезновением неразложившегося ядра ($r=0$). Необходимо отметить, что с ростом размеров исходных кусков, сближение P и p_0 замедляет процесс декарбонизации. При этом противоположно влияют коэффициент диффузии и температура. Увеличение температуры и коэффициента диффузии ускоряет процесс декарбонизации, особенно температура, которая влияет на декарбонизацию через k_1 , p_0 и D . Проведенные нами широкомасштабные эксперименты подтверждают вышесказанное [3-7]. Для получения полной информации массообмена при декарбонизации CaCO_3 необходимо принять во внимание и теплообмен, что, естественно, усложняет задачу ввиду того, что мы имеем дело с неизотермичностью температурного поля.

Неизотермичность температурного поля сказывается на различии скоростей реакции декарбонизации CaCO_3 , связанной с различием температур кусков известняка.

Далее приводим решение задачи, выполненное Гельдом и Ивановым [14]. Для учета теплообмена принимаем во внимание граничные условия I рода на поверхности сферического куска:

$$T = T_a = \text{const} \quad (14)$$

Кроме известных уравнений (6) математическая задача должна содержать зависимость, определяющая развитие теплообмена. Дифференциальное уравнение теплопроводности Фурье имеет следующий вид:

$$c\delta dt/d\tau = \lambda(\partial^2 t/\partial x^2 + \partial^2 t/\partial y^2 + \partial^2 t/\partial z^2), \quad (15)$$

Для задачи декарбонизации известняка пренебрегаем расходом тепла на нагрев продуктов декарбонизации (CaO , CO_2).

Таким образом, выражение (15) запишем в виде:

$$\partial^2 t/\partial x^2 + \partial^2 t/\partial y^2 + \partial^2 t/\partial z^2 = 0, \quad (16)$$

Граничные условия задачи для куска CaCO_3 сферической формы:

– на поверхности $z=R, t=t_{\text{пов}}; \quad (17)$

– в центре

$$r=0, \partial t/\partial r=0; \quad (18)$$

– на границе (фронте) реакции $r=r^*, t=t_p + \Delta t = t^*, \quad (19)$

Решение дифференциального уравнения теплопроводности Фурье (15) запишется в виде:

$$t = t_{\text{пов}} - (t_{\text{пов}} - t^*) (R/r - 1) r^*/(R - r^*), \quad (20)$$

Решение (20) характеризует температурное поле куска CaCO_3 , связано с тепловым потоком наружного слоя и тепловым эффектом декарбонизации CaCO_3 , при этом плотность теплового потока

$$q^* = -\lambda (\partial t / \partial r)_{r=r^*}; \quad (21)$$

Тепловой поток (21) расходуется на декарбонизацию CaCO_3 , т. е.:

$$q^* = Q \delta \partial r^* / \partial \tau, \quad (22)$$

где Q – тепловой эффект к CaCO_3 .

Совместное решение уравнений (15), (16), (20) и (22) позволяет получить:

$$t_{\text{пов}} - t^* = -(Q\delta/\lambda) \cdot [r^*(R-r^*)/R] \partial r^* / \partial \tau \quad (23)$$

В нашем случае можно пренебречь перегревом реакционной зоны Δt , так как в доменных и обжиговых печах CaCO_3 разлагается при температуре $t = 900 \div 1000$ °C и $\Delta t = 30 \div 40$ °C. В связи с указанным допущением

$$(r^*)_{\tau=0} = R \text{ и } (r^*)_{\tau=0} = r^* \quad (24)$$

Уравнение (13) после интегрирования и соответствующих преобразований запишется в следующем виде:

$$\tau = \{Q_p / [\lambda(t_{\text{пов}} - t_p)]\} [R^2/6 + r^{*3}/(3r) - r^{*2}/2] \quad (25)$$

Выражение (25) устанавливает связь количества декарбонизированного CaCO_3 и времени с другими параметрами и характеристиками процесса декарбонизации.

Время полной декарбонизации CaCO_3 можно определить из условия $r^* = 0$ по следующей зависимости

$$\tau_{\text{полн}} = (Q_p/\lambda)R^2/[6(t_{\text{пов}} - t_p)] \quad (26)$$

В зависимости от вида известкового вяжущего различают три типа твердения (рис. 3) [1, 2, 9].



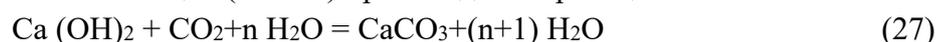
Рис. 3. Типы твердения известкового вяжущего
Fig. 3. Types of hardening of lime binder

Карбонатное твердение извести по-другому называется карбонизацией (рис. 4). Карбонизация – это процесс затвердевания, длительный по времени, растворных смесей, изготовленных на основе гашеной извести, при воздействии на них углекислого газа.



Рис. 4. Карбонатное твердение известковых и растворных смесей
Fig. 4. Carbonate hardening of lime and mortar mixtures

Образование карбоната кальция (CaCO_3) происходит по реакции:



При затворении водой CaO получаем гидроксид кальция Ca(OH)_2 , который представляет собой гелевидную массу. После удаления воды гелевидная масса известкового теста уплотняется и упрочняется. При высыхании в структуре уплотненной массы известкового теста образуются поры и капилляры, заполненные водой. Силы поверхностного натяжения вызывают внутреннее капиллярное давление, стягивающее частицы извести и заполнителя, что придает композиту дополнительную прочность [11-16].

Твердение известкового композита происходит в результате срачивания кристалликов, образующегося карбоната с частицами гидроксида кальция (Ca(OH)_2) и заполните-

ля. При карбонизации гидрата окиси кальция $\text{Ca}(\text{OH})_2$ объем твердой фазы увеличивается. При увеличении объема твердой фазы дополнительно уплотняется и упрочняется твердеющий известковый композит. В процессе карбонизации образовывается, наряду с карбонатом кальция, разные соединения типа $\text{CaCO}_3 \cdot n \text{Ca}(\text{OH})_2 \cdot m \text{H}_2\text{O}$.

При твердении известкового композита очень медленно испаряется вода и медленно протекает процесс карбонизации. Процесс карбонизации может занять несколько десятков лет. Объясняется это тем, что карбонизация захватывает, преимущественно, поверхностный слой при малой концентрации углекислого газа CO_2 (примерно 0,03 %), а большая плотность пленки, образующегося карбоната, затрудняет дальнейшее проникание CO_2 во внутрь известкового композита. В начальный период твердения композитов из гашеной извести на рост их прочности влияют процессы высыхания и перекристаллизации частиц $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Воздушные и гидравлические известковые вяжущие вещества можно производить промышленным способом [4]. Известь может применяться в качестве вяжущего для ремонтно-реставрационных растворов с соответствующим подбором соотношений по объему и введением необходимых наполнителя, заполнителя и добавки, что планируется в экспериментальной части работы [5, 7]. Введение заполнителей, наполнителей и добавок важно для обеспечения оригинальности разработанных ремонтно-реставрационных составов.

При карбонизации выделяется вода, которая способствует замедлению карбонизации. В оптимальном режиме карбонизация осуществляется при влажности составов от 4 до 7%. При введении в ремонтно-реставрационные составы инертных заполнителей значительно уменьшаются усадочные деформации, что очень важно для обеспечения качества ремонтных, восстановительных и реставрационных работ.

Например, при введении в известковые составы кварцевого песка тонкого помола происходит взаимодействие между кремнеземом и известью, способствующее ускорению процесса твердения и увеличению прочности на сжатие и растяжение при изгибе, что связано с аморфизацией поверхностных слоев кварцевых частичек при увеличении тонкости помола и возрастанием их активности при взаимодействии с $\text{Ca}(\text{OH})_2$ [1, 2]. Таким образом, можно карбонизировать ремонтно-реставрационные составы искусственным путем.

Обсуждение результатов. Результаты исследований подтверждают возможность получения известковых композитов с помощью искусственной карбонизации и достижения при этом высокой прочности на сжатие ($250 \div 350 \text{ кг/см}^2$). Значительную эффективность показали композиты на основе молотой негашеной извести с добавкой 0,2% от веса извести мелассы. Добавление мелассы способствует ускорению карбонизации и повышению прочности. Результаты исследований выявили зависимость интенсивности карбонизации от содержания воды и влажности. Удаление воды или снижение влажности путем сушки снижает процесс карбонизации. Установлено также, что высокая влажность прекращает карбонизацию. Декарбонизация при производстве известковых вяжущих и карбонизация ремонтно-реставрационных составов и других известковых материалов, в том числе и с применением искусственных методов, недостаточно исследованы, и, соответственно, разработки в этом направлении имеют научную и практическую ценность.

Исходными материалами для производства вяжущих веществ являются различные горные породы. Магнезиальные вяжущие получают из природных магнезитов и доломитов, а гидратную и гидравлическую известь из карбонатных горных пород (известняки, мел, доломиты, мергели), что является основным вяжущим в составе ремонтно-реставрационной композиции. По результатам исследований отобранных проб раствора кладки стен башенных строений и путем изучения сведений литературных источников, касающихся опыта строительства, реставрации, ремонта и восстановления ОКН, свидетельских показаний жителей горных районов, а также умозрительного анализа разработаны составы растворов на основе воздушной и гидравлической известей и органических добавок (табл. 1).

Таблица 1. Экспериментальные составы раствора для каменной кладки стен старинных башенных и некропольных строений на одну балочку 4x4x16 см
Table 1. Experimental mortar compositions for masonry of ancient tower and necropolis buildings for one beam 4x4x16 cm

№ состава Number	Известковое тесто, гр. Lime dough	Сланцевая крошка, гр. Slate crumb, gr.	Доломитовый песок фр. 0-2,5, гр. Dolomite sand fr. 0-2.5, gr.	Цемянка, гр. Semenka, gr.	Вода, гр. Water,	Клей казеиновый, гр. Casein glue,	Известь пушонка, гр. Slaked lime, gr.	Древесная зола, гр. Wood ash, gr.	Яичная масса, гр. Egg mass, gr.	Творог обезжиренный, гр. Low-fat cottage cheese, gr.	Фибра стекловолоконная, гр. Glass fiber, gr.	Простокваша, гр. Sour milk, gr.
1	-	180	310	40	-	80	25	7	-	-	-	-
2	-	180	310	35	-	78	24	8	-	-	-	-
3	84	165	280	35	7	-	-	7	-	17	-	-
4	84	165	280	31	8	-	-	14	15	13	-	-
5	-	235	150	25	-	96	35	9	-	-	-	-
6	90	230	150	26	30	-	-	-	-	9	-	-
7	84	168	299	26	47	2	-	14	-	-	-	-
8	85	220	143	25	35	2	-	-	-	-	1	-
9	84	161	300	19	24	5	-	13	-	-	-	-
10	70	272	86	18	22	7	-	10	-	-	-	-
11	70	272	86	25	22	7	-	10	-	-	-	-
12	-	330	-	-	-	-	60	40	43	-	-	30
13	-	360	-	-	-	-	103	30	-	-	-	55

Физико-механические свойства экспериментальных составов раствора представлены в табл. 2.

Таблица 2. Физико-механические свойства экспериментальных составов раствора
Table 2. Physical and mechanical properties of experimental solution compositions

№ экспериментального состава Experimental composition No.	Прочность на растяжение при изгибе, кг/см ² Tensile strength in bending, kg/cm ²	Прочность сцепления раствора в каменной кладке, кг/см ² Adhesion strength of mortar in masonry, kg/cm ²	Прочность на сжатие, кг/см ² Compressive strength, kg/cm ²
1	0,5	0,3	4,7
2	12,9	0,9	15,4
3	15,5	1,65	29,2
4	1,1	0,6	8,8
5	11,0	0,9	14,3
6	0,4	0,4	5,7
7	0,4	0,5	4,0
8	0,7	0,3	3,82
9	8,5	1,75	41,0
10	0,4	0,3	3,5
11	0,4	0,3	3,1
12	4,7	1,48	25,4
13	0	0	0,2

Применяемые для ремонта, реставрации и восстановления памятников истории и культуры составы являются многокомпонентными, так как при их приготовлении используются различные добавки органического происхождения (рис. 5).

Для приготовления ремонтно-реставрационных составов оптимальной является гидравлическая известь. Ремонтные и реставрационные смеси на гидравлической извести пластичной консистенции при 28-суточном твердении дают прочность на сжатие 30 кг/см² и более – в зависимости от гидравлического модуля использованного гидравлического вяжущего. Долговечность ремонтных и реставрационных растворов на гидравлической извести сравнительно высока, поэтому памятники истории и культуры XV-XVI вв., уцелевшие от техногенных воздействий, сохранили свою несущую способность [2, 4, 6].

Соотношения компонентов устанавливаются в зависимости от требуемой марки смеси (гидравлическая известь, сланцевая крошка, доломитовый песок, цемянка, зола, казеин). Пропорции компонентов представлены в табл. 3.

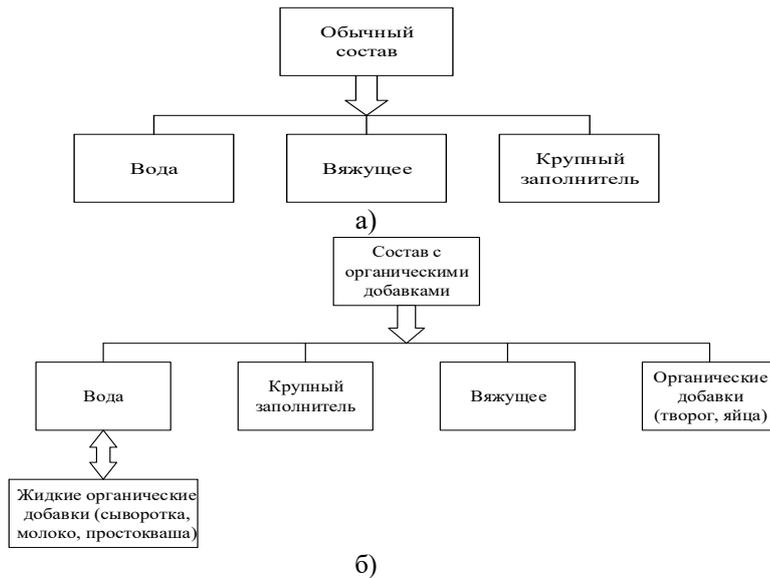


Рис. 5. Обычный состав (а) и состав с органическими добавками (б)
 Fig. 5. Conventional composition (a) and composition with organic additives (b)

Марка раствора определялась испытанием на сжатие балочек размерами 40x40x160 мм в возрасте 28 суток при температуре твердения 20±3°C.

Таблица 3. Экспериментальные составы раствора для каменной кладки стен старинных башенных и некропольных строений на одну балочку 4x4x16 см

Table 3. Experimental mortar compositions for masonry of walls of ancient tower and necropolis buildings for one beam 4x4x16 cm

№/ No. состава	Сланцевая крошка, гр. Slate crumb, gr.	Доло-митовый песок фр. 0-2,5, гр. Dolomite sand fr.	Цемянка, гр. Семенка, gr.	Вода, гр. Water	Гидравлическая известь, гр Hydraulic lime	Известь пушонка, гр. Slaked lime, gr	Древесная зола, гр. Wood ash, gr.
1	160	250,8	19,4	90	39	44,2	1
2	182,5	243,2	23	69,3	30,7	42,7	2
3	91	272	23,5	123	33,2	47	1
4	160	250,8	19,4	120	83	-	1
5	182,5	243,2	23	130	73	-	2
6	91	272	23,5	123	80,6	-	1
7	160	250	19	190	79	-	1
8	160	250	19	174	40	39	1
9	91	270	24	170	80	-	1
10	180	240	19	175	70	-	2
11	180	250	19	170	73	30	1

Физико-механические свойства экспериментальных составов раствора представлены в табл. 4.

Таблица 4. Физико-механические свойства экспериментальных составов раствора

Table 4. Physicomechanical properties of experimental solution compositions

№ экспериментального состава No.	Прочность на растяжение при изгибе, кг/см ² Tensile strength in bending, kg/cm ²	Прочность на сжатие, кг/см ² Compressive strength, kg/cm ²
1	2,22	19,8
2	2,13	16,0
3	1,89	5,6
4	2,34	20,0
5	0,93	6,0
6	2,03	6,2
7	2,22	46,68
8	2,13	47,06
9	1,9	21,6
10	2,1	25,66
11	0,9	33,0

Вывод. Исследован тепломассообмен в процессах диссоциации (декарбонизации) и карбонизации воздушных и гидравлических известковых вяжущих веществ и ремонтно-реставрационных составов на их основе и рассчитаны фронт разложения, границы разложения известняка, время диссоциации и скорость реакции диссоциации.

Изучены типы твердения извести (карбонатное, гидратное и гидросиликатное) и механизм ее твердения. Выявлена зависимость интенсивности карбонизации от содержания воды и влажности. Рассмотрены технологии промышленного и кустарного производства воздушных и гидравлических известковых вяжущих веществ.

В результате выполненных исследований разработаны новые материалы и технологии для ремонта, восстановления и реставрации ОКН (памятников истории и культуры), отвечающие предъявляемым ремонтно-реставрационным требованиям. Ожидаемый годовой экономический эффект от внедрения разработанных ремонтно-реставрационных составов составляет около 5,5 млн. рублей.

Библиографический список:

1. Амханицкий Г.Я. Исследование фазовых превращений виброгазобетона в наружных стеновых панелях / Долговечность конструкций из автоклавных бетонов. // Левин С.Н., Юдина Т.П. - Таллин. - 1978. - С.94-98.
2. Багров Б.О. Карбонизационная стойкость бетона на шлакощелочном вяжущем // Долговечность конструкций из автоклавных бетонов. - Таллин. - 1981. - С.97-99.
3. Батаева П.Д. Магнезиальное вяжущее для приготовления ремонтно-реставрационного состава // Вестник Комплексного научно-исследовательского института им. Х.И. Ибрагимова Российской академии наук – 2020. – № 4. – С. 43-49.
4. Батаева П.Д. Обзор составов и технологий для ремонта и реставрации объектов культурного наследия // Вестник Комплексного научно-исследовательского института им. Х.И. Ибрагимова Российской академии наук. – 2021. – № 5. – С. 49-53.
5. Батаев Д.К.-С. Органо-неорганические вяжущие для ремонта и реставрации памятников истории и культуры башенного типа / Шеина С.Г., Муртазаев С-А.Ю., Батаева П.Д. // Материалы конференции «Актуальные вопросы современной науки: теория, технология, методология и практика», приуроченной к 60-тилетию член-корреспондента Академии наук ЧР, доктора технических наук, профессора Сайд-Альви Юсуповича Муртазаева. – Грозный: АЛЕФ, – 2021. – С. 129-135.
6. Баженов Ю.М. Перспективы разработки наноструктурных полимеркомпозитов в Чеченской Республике / Батаев Д.К.-С., Муртазаев С-А.Ю., Мажиев Х.Н., Батаева П.Д. // Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 95-летию ФГБОУ ВПО «ГГНТУ им. акад. М.Д. Миллионщикова». Том I. – Грозный: ГГНТУ, 2014. – С. 51-62.
7. Батаева П.Д. Составы для ремонта, восстановления и реставрации объекта культурного наследия // IV Международное книжное издание стран Содружества Независимых Государств «Лучший молодой ученый - 2021». Нур-Султан: Международная ассоциация молодых ученых, 2021. – С. 53-58.
8. Камерлох Н.А. К вопросу о механизме перекристаллизации микроструктуры ячеистых бетонов при карбонизации // Долговечность конструкций из автоклавных бетонов. Таллин. 1984. Ч.1. - С.129-131.
9. Тимаков Ю.В. Исследование процессов карбонизации и увлажнения наружных газобетонных панелей с различными отделками при службе в стене дома // Долговечность конструкций из автоклавных бетонов. - Таллин. - 1978. - С.90-93.
10. Телегин А.С. Тепломассоперенос: Учебник для вузов: 2-е изд., перераб. И доп. / Швыдкий В.С., Ярошенко Ю.Г. // Под редакцией Ю.Г. Ярошенко. – М.: ИКС «Академкнига», 2002. -455 с.
11. Kruml F. Influence of saturation degree of autoclaved aerated concretes on their creep, Autoclaved Aerated Concretes, moisture and Properties, Netherlands, 1983, s. 249-256.
12. Lach V. Problemy karbonatuce lehkych beton. - Stavebui vyzkum, 1971, 15, № 4, p.1-7.
13. Matoušek M., Miškovský I. Pusěvek k Trvanlivosty některých porobetonových staved. Sbornik VUT v brně, 1971, N1-4, s. 301-307.
14. Parrot L.I. Increase in Creep of Hardened Cement Past due to Carmonaion unde Load. - Magazine Concrete Research, 1975, IX, v.27, № 92, p. 181-187.
15. Schaffler H., Druckfestigkeit von dampfgehartetem Casbeton nach, vershildener lagerung. - In: Ligttweight Concrete / RILEM, Göteborg, 1961, s. 62-78.
16. Vasicek I. Trvanlivost a odolnost autoklavovovanych porovitych betonu pri posobeni susnych Vnejsich jena. - Stavivo, 1965, N6, p. 136-149.

References:

1. Amkhanitsky G.Ya. Investigation of phase transformations of vibro-aerated concrete in external wall panels / Levin S.N., Yudina T.P. *Durability of structures from autoclaved concrete*. Tallinn. 1978;94-98.
2. Bagrov B.O. Carbonization resistance of concrete based on slag-alkali binder. *Durability of structures made of autoclaved concrete*. Tallinn. 1981;97-99.
3. Bataeva P.D. Magnesian binder for the preparation of repair and restoration composition. *Bulletin of the Complex Research Institute. H.I. Ibragimov of the Russian Academy of Sciences* 2020(4): 43-49. (In Russ)
4. Bataeva P.D. Review of compositions and technologies for the repair and restoration of cultural heritage objects. *Bulletin of the Complex Research Institute. H.I. Ibragimov of the Russian Academy of Sciences*. 2021;5: 49-53. (In Russ)
5. Bataev D.K-S. Organo-inorganic binders for the repair and restoration of monuments of history and culture of the tower type / Sheina S.G., Murtazaev S-A.Yu., Bataeva P.D. Proceedings of the conference "Topical issues of modern science: theory, technology, methodology and practice", dedicated to the 60th anniversary of the Corresponding Member of the Academy of Sciences of the Chechen Republic, Doctor of Technical Sciences, Professor Said-Alvi Yusupovich Murtazaev. - Grozny: ALEF, - 2021; 129-135. (In Russ)
6. Bazhenov Yu.M. Prospects for the development of nanostructured polymer composites in the Chechen Republic / Bataev D.K-S., Murtazaev S-A.Yu., Mazhiev Kh.N., Bataeva P.D. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference dedicated to the 95th anniversary of GGNTU im. acad. M.D. Millionshchikov. Volume I. - Grozny: GGNTU, 2014;51-62. (In Russ)
7. Bataeva P.D. Compositions for the repair, restoration and restoration of a cultural heritage site // IV International Book Edition of the Commonwealth of Independent States "Best Young Scientist - 2021". - Nur-Sultan: International Association of Young Scientists, 2021; 53-58.
8. Kamerlokh N.A. To the question of the mechanism of recrystallization of the microstructure of cellular concretes during carbonization. *Durability of structures from autoclave concretes*. Tallinn. 1984;1:129-131.
9. Timakov Yu.V. Investigation of the processes of carbonization and moistening of external aerated concrete panels with various finishes during service in the wall of a house. *Durability of structures from autoclaved concrete*. Tallinn. 1978;90-93.
10. Telegin A.S. Heat and Mass Transfer: Textbook for High Schools: 2nd ed., Revised. And extra. Shvydkiy V.S., Yaroshenko Yu.G.. Under the editorship of Yu.G.Yaroshenko. М.: ICS "Akademkniga", 2002; 455. (In Russ)
11. Kruml F. Influence of saturation degree of autoclaved aerated concretes on their creep, Autoclaved Aerated Concretes, moisture and Properties, Netherlands, 1983; 249-256.
12. Lach V. Problemy karbonatuce lehkych beton. - Stavebui vyzkum, 1971;15(4):-7.
13. Matoušek M., Miskovský I. Pusěvek K. Trvanlivost některých porobetonových staved. Sbornik VUT v brně, 1971;1-4: 301-307.
14. Parrot L.I. Increase in Creep of Hardened Cement Past due to Carnonaion unde Load. - Magazine Concrete Research, 1975; IX.27(92):181-187.
15. Schaffler H., Druckfestigkeit von dampfgehartetem Casbeton nach, vershildener lagerung. - In: Light-weight Concrete. *RILEM, Göteborg*, 1961; 62-78.
16. Vasicek I. Trvanlivost a odolnost autoklavovovanych porovitych betonu pri posobeni susnych Vnejsich jena. - Stavivo, 1965;6:136-149.

Сведения об авторах:

Батаева Петимат Денаевна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории металлов, сплавов и композиционных материалов; bataeva_ggntu@mail.ru

Аларханова Зура Зилаудиновна, кандидат химических наук, доцент, заведующая лабораторией высокомолекулярных соединений; alarh2000@mail.ru

Батаева Хава Маршаниевна, младший научный сотрудник лаборатории высокомолекулярных соединений; ya.vashka@mail.ru

Батаев Адам Денаевич, аспирант; adam.bataev1993@mail.ru

Information about the authors:

Petimat D. Bataeva, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Laboratory of metals, alloys and composite materials; bataeva_ggntu@mail.ru

Zura Z. Alarkhanova, Cand. Sci. (Chemical), Assoc. Prof, Head of the laboratory of high-molecular compounds; alarh2000@mail.ru

Khava M. Bataeva, Junior Researcher, Laboratory of high-molecular compounds; ya.vashka@mail.ru

Adam D. Bataev, Postgraduate Student; adam.bataev1993@mail.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 15.06.2024.

Одобрена после рецензирования/ Revised 21.07.2024.

Принята в печать/Accepted for publication 11.10.2024.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 624.04



DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-4-191-200

Оригинальная статья /Original article

Моделирование ползучести для замкнутой цилиндрической оболочки при гидростатическом давлении

М.А. Магомедов¹, В.В. Кузнецов², Б.М. Языев³, С.В. Литвинов³

¹Дагестанский государственный технический университет,

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

²Комплексный научно-исследовательский институт им. Х.И. Ибрагимова РАН,

²364051, г. Грозный, В. Алиева (Старопромысловское шоссе), 21а, Россия,

³Донской государственный технический университет,

³344003, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина 1, Россия

Резюме. Цель. В статье представлены общие уравнения моментной теории оболочки нулевой гауссовой кривизны с учетом деформации ползучести. Рассматривается задача о напряженном-деформированном состоянии оболочки с граничными условиями: жестко закрепленная в основании и свободном крае наверху. Цилиндр подвержен действию внутреннего гидростатического давления. **Метод.** Получено разрешающее линейное неоднородное дифференциальное уравнение четвертого порядка относительно прогиба. Решение приводится в программном комплексе MATLAB. Нелинейное уравнение Максвелла-Гуревича использовано как уравнение состояния между деформациями ползучести и напряжениями. Для определения деформаций ползучести применялась линейная аппроксимация первой производной по времени (метод Эйлера). **Результат.** Произведен расчет оболочки из вторичного ПВХ, выполненный методом сеток. Методика апробирована путем сравнения решения с расчетом и другими известными решениями. Разработана программа для расчета в пакете MATLAB с возможностью вариации исходных данных и выводом графика зависимости перемещений напряжений от времени. Установлено, что в процессе ползучести в оболочке на 14,7% возрастают окружные напряжения. **Вывод.** Предложенный подход может быть применен к анализу напряженно-деформированного состояния и несущей способности также и железобетонной оболочки. Ограничений по граничным условиям и видам нагружения нет, а материалом балки могут быть не только полимеры и композиты строительного назначения, но и бетон.

Ключевые слова: ползучесть бетона, неупругие коэффициенты, относительная деформация, уравнение связи Максвелла-Гуревича, изгибающие моменты, переменная жесткость, функции Крылова

Для цитирования: М.А. Магомедов, В.В. Кузнецов, Б.М. Языев, С.В. Литвинов. Моделирование ползучести для замкнутой цилиндрической оболочки при гидростатическом давлении. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2024; 51(4): 191-200. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-4-191-200

Modeling creep for a closed cylindrical shell under hydrostatic pressure

M.A. Magomedov¹, V.V. Kuznetsov², B.M. Yazyev³, S.V. Litvinov³

¹Daghestan State Technical University,

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

²Kh. Ibragimov Complex Institute of the Russian Academy of Sciences,

²21a V. Aliyeva (Staropromyslovskoe) highway, Grozny 364051, Russia,

³Don State Technical University,

³1 Gagarin Square, Rostov-on-Don 344003, Russia

Abstract. Objective. The paper presents general equations of the moment theory of a shell of zero Gaussian curvature taking into account creep deformation. The problem of the stress-strain state of a shell is considered, with the boundary conditions: rigidly fixed at the base and free edge at the top. The cylinder is subject to internal hydrostatic pressure. **Method.** A linear non-homogeneous differential equation of the fourth order with respect to deflection is obtained. The solution is given in the MATLAB software package. The non-linear Maxwell-Gurevich equation is used as the equation of state between creep deformations and stresses. To determine creep deformations, a linear approximation of the first derivative with respect to time (Euler's method) was used. **Result.** The calculation of the shell made of secondary PVC was performed using the grid method. The method was tested. A program for calculation in the MATLAB package was developed with the possibility of varying the initial data and outputting a graph of the dependence of stress displacements on time. During creep in the shell, circumferential stresses increase by 14.7%. **Conclusion.** The proposed approach can be applied to the analysis of the stress-strain state and bearing capacity of a reinforced concrete shell as well. There are no restrictions on boundary conditions and the type of loading, and the beam material can be not only polymers and composites for construction purposes, but also concrete.

Keywords: concrete creep, inelastic coefficients, relative deformation, Maxwell-Gurevich constraint equation, bending moments, variable stiffness, Krylov functions

For citation: M.A. Magomedov, V.V. Kuznetsov, B.M. Yazyev, S.V. Litvinov. Modeling creep for a closed cylindrical shell under hydrostatic pressure. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2024;51(4):191-200. DOI:10.21822 /2073-6185-2024-51-4-191-200

Введение. Полимеры и композиты в настоящее время являются одним из перспективных конструкционных материалов в строительстве. Этот материал отличается рядом существенных особенностей, которые необходимо учитывать при проектировании строительных конструкций. Имеющиеся экспериментальные исследования неоднократно подтвердили, что действие длительных нагрузок приводит к изменению процесса деформирования [1]. Факторы силового сопротивления полимеров и композитов строительного назначения с учетом совместного действия нелинейности и неравновесности деформирования, статических и динамических нагружений требуют дополнительного изучения для решения статически неопределимых систем. Разработка новых и совершенствование существующих методов моделирования и расчета различных состояний и процессов в конструкциях из полимеров, вопросы реологического расчета, особенно нелинейного, для пластин и оболочек, по-прежнему, является одной из актуальных проблем.

Постановка задачи. Для расчета цилиндрических резервуаров, конечно, можно воспользоваться безмоментной теорией оболочек. Но безмоментные оболочки воспринимают нагрузку только за счет растяжения и не предполагают возникновения в них изгибающих моментов и перерезывающих сил. Однако, далеко не всегда бывает возможным обеспечить условия возникновения чисто безмоментного состояния. Тогда приходится применять более сложную теорию расчета, учитывающую, кроме деформаций растяжения, еще и появление деформаций изгиба, деформаций ползучести [2-5].

Методы исследования. Рассмотрим круговой цилиндрический резервуар постоянной толщины (рис. 1). Данная задача является осесимметричной, однако для начала получим общие уравнения ползучести круговой цилиндрической оболочки при ее произвольном нагружении.

Вывод разрешающих уравнений. Параметры Ламе для круговой цилиндрической оболочки имеют вид:

$$A = \sqrt{1 + \left(\frac{dr}{dz}\right)^2}, \quad B = r \rightarrow A = 1, B = R = const \quad (1)$$

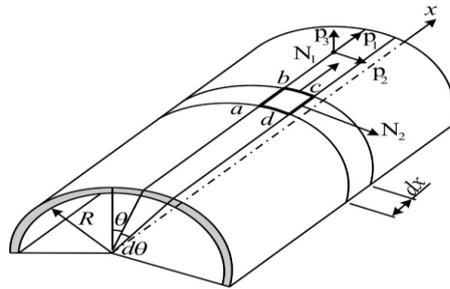


Рис. 1. а) Срединная поверхность цилиндрической оболочки

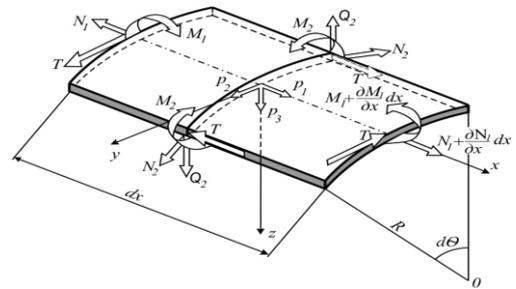


Рис. 1. б) Элемент оболочки, находящийся в равновесии под действием внутренних усилий

Fig. 1. a) Middle surface of a cylindrical shell

Fig. 1. b) Shell element in equilibrium under the action of internal forces

Очевидно, главными радиусами кривизн срединной поверхности являются величины $R_1 = \infty$, $R_2 = R$, где R – радиус оболочки. Если принять в них значения параметров Ламе по формуле (1). Уравнение равновесия имеет вид:

$$\begin{bmatrix} R \frac{\partial}{\partial x} & 0 & \frac{\partial}{\partial \theta} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial \theta} & R \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & R \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial \theta} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -R & 0 & \frac{\partial}{\partial \theta} \\ 0 & 0 & 0 & -R & R \frac{\partial}{\partial \theta} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} N_1 \\ N_2 \\ T \\ Q_1 \\ Q_2 \\ M_1 \\ M_2 \\ H \end{Bmatrix} + R \begin{Bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (2)$$

Система пяти уравнений легко сводится к эквивалентной системе трёх уравнений, для чего достаточно из четвёртого и пятого условий выразить величины поперечных усилий:

$$\begin{Bmatrix} Q_2 \\ Q_1 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial \theta} & \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial \theta} & 0 & \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} M_1 \\ M_2 \\ H \end{Bmatrix} \quad (3)$$

и подставить их во второе и третье условия (2). В итоге преобразований приходят к более обзримой системе:

$$\begin{bmatrix} R \frac{\partial}{\partial x} & 0 & \frac{\partial}{\partial \theta} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial \theta} & R \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 & R \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial \theta} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} N_1 \\ N_2 \\ T \\ Q_1 \\ Q_2 \end{Bmatrix} + R \begin{Bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (4)$$

где N_1, N_2 – продольные силы, T – сдвигающая сила, Q_1, Q_2 – поперечные усилия, p_1, p_2, p_3 – компоненты поверхностной нагрузки.

Геометрические соотношения согласно [6,7], деформации элемента срединной поверхности можно установить на основе общих геометрических зависимостей:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial \theta} & \frac{1}{R} \\ \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial \theta} & \frac{\partial}{\partial x} & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} + z \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{\partial^2}{\partial x^2} \\ 0 & \frac{1}{R^2} \frac{\partial}{\partial \theta} & -\frac{1}{R^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \\ 0 & \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial \theta} & -\frac{2}{R} \frac{\partial^2}{\partial x \partial \theta} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} \quad (5)$$

где u, v, w – перемещения срединной поверхности в соответствии координат x, θ, z .

В (5) первое слагаемое – срединной поверхности, второе слагаемое – изменения кривизн. Введем обозначения:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1^0 \\ \varepsilon_2^0 \\ \gamma^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial \theta} & \frac{1}{R} \\ \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial \theta} & \frac{\partial}{\partial x} & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_0 \\ v_0 \\ w \end{Bmatrix}; \quad \begin{bmatrix} \chi_1 \\ \chi_2 \\ \chi_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{\partial^2}{\partial x^2} \\ 0 & \frac{1}{R^2} \frac{\partial}{\partial \theta} & -\frac{1}{R^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \\ 0 & \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial \theta} & -\frac{2}{R} \frac{\partial^2}{\partial x \partial \theta} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_0 \\ v_0 \\ w \end{Bmatrix} \quad (6)$$

Физические соотношения с учетом деформаций ползучести на основе первой гипотезы теории расчёта оболочек, как и пластинок, зависимость напряжений от деформаций принимается в виде:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \left(\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} \varepsilon_1^{cr} \\ \varepsilon_2^{cr} \\ \gamma^{cr} \end{Bmatrix} \right); \quad (7)$$

или

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \left(\begin{Bmatrix} \varepsilon_1^0 \\ \varepsilon_2^0 \\ \gamma^0 \end{Bmatrix} + z \begin{Bmatrix} \chi_1 \\ \chi_2 \\ 2\chi_{12} \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} \varepsilon_1^{cr} \\ \varepsilon_2^{cr} \\ \gamma^{cr} \end{Bmatrix} \right); \quad (8)$$

Продольные силы представим, как:

$$\begin{Bmatrix} N_1 \\ N_2 \\ T \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_1 dz \\ \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_2 dz \\ \int_{-h/2}^{h/2} \tau_{12} dz \end{Bmatrix} = \frac{Eh}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1^0 \\ \varepsilon_2^0 \\ \gamma^0 \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} N_1^{cr} \\ N_2^{cr} \\ T^{cr} \end{Bmatrix}; \quad (9)$$

где

$$\begin{Bmatrix} N_1^{cr} \\ N_2^{cr} \\ T^{cr} \end{Bmatrix} = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{Bmatrix} \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} [1 \quad \nu \quad 0] \begin{Bmatrix} \varepsilon_1^{cr} \\ \varepsilon_2^{cr} \\ \gamma^{cr} \end{Bmatrix} dz \\ \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} [\nu \quad 1 \quad 0] \begin{Bmatrix} \varepsilon_1^{cr} \\ \varepsilon_2^{cr} \\ \gamma^{cr} \end{Bmatrix} dz \\ \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} [0 \quad 0 \quad \frac{1-\nu}{2}] \begin{Bmatrix} \varepsilon_1^{cr} \\ \varepsilon_2^{cr} \\ \gamma^{cr} \end{Bmatrix} dz \end{Bmatrix}; \quad (10)$$

Соотношения для изгибных и крутящих моментов определяются как:

$$\begin{Bmatrix} M_1 \\ M_2 \\ H \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_1 z dz \\ \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_2 z dz \\ \int_{-h/2}^{h/2} \tau_{12} z dz \end{Bmatrix} = -D \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & (1-\nu) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \chi_1 \\ \chi_2 \\ \chi_{12} \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} M_1^{cr} \\ M_2^{cr} \\ H^{cr} \end{Bmatrix}; \quad (11)$$

где

$$\begin{Bmatrix} M_1^{cr} \\ M_2^{cr} \\ H^{cr} \end{Bmatrix} = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{Bmatrix} \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} [1 \quad \nu \quad 0] \begin{Bmatrix} \varepsilon_1^{cr} \\ \varepsilon_2^{cr} \\ \gamma^{cr} \end{Bmatrix} z dz \\ \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} [\nu \quad 1 \quad 0] \begin{Bmatrix} \varepsilon_1^{cr} \\ \varepsilon_2^{cr} \\ \gamma^{cr} \end{Bmatrix} z dz \\ \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \left[0 \quad 0 \quad \frac{(1-\nu)}{2} \right] \begin{Bmatrix} \varepsilon_1^{cr} \\ \varepsilon_2^{cr} \\ \gamma^{cr} \end{Bmatrix} z dz \end{Bmatrix}; \quad (12)$$

где $D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$ цилиндрическая жесткость

Обсуждение результатов. Рассмотрим случай, представляющий практическое значение – замкнутую цилиндрическую оболочку, подверженную гидростатическому действию жидкости на стенки вертикального резервуара (рис. 1).

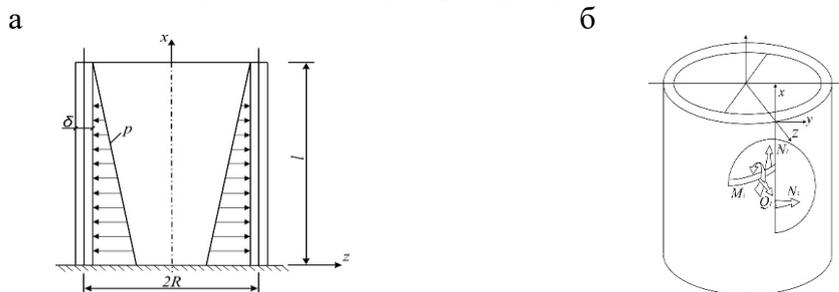


Рис. 2. Осесимметричное нагружение цилиндрической оболочки внутренние усилия
 Fig. 2. Axisymmetric loading of a cylindrical shell internal forces

При наличии осевой симметрии основные уравнения существенно упрощаются. Сдвигающее усилие S и крутящий момент H обращаются в нуль. Усилия, деформации и перемещения, благодаря симметрии, не зависят от полярного угла θ , соответственно все производные по θ в указанных уравнениях также обращаются в нуль. Оставшиеся усилия, показанные на рис. 2 б Примем, что из составляющих поверхностных нагрузок отлична от нуля только одна: $p_3 = q = \gamma(l - x)$, где γ – удельный вес жидкости.

Равновесная система принимает вид:

$$\begin{cases} 1. & \frac{dN_1}{dx} = 0; \\ 2. & \frac{d^2M_1}{dx^2} - \frac{N_2}{R} + q = 0 \end{cases} \quad (13)$$

Из уравнений (9) и (11) останутся:

$$\begin{cases} 1. & N_1 = \frac{Eh}{1-\nu^2} \cdot \left(\frac{du_0}{dx} + \nu \frac{w}{R} \right) - N_1^{cr} = 0 \\ 2. & N_2 = \frac{Eh}{1-\nu^2} \cdot \left(\frac{w}{R} + \nu \frac{du_0}{dx} \right) - N_2^{cr} \\ 3. & M_1 = -D \frac{d^2w}{dx^2} - M_1^{cr} \\ 4. & M_2 = -\nu D \frac{d^2w}{dx^2} - M_2^{cr} \end{cases} \quad (14)$$

Из уравнений (6) для деформаций останутся:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1^0 \\ \varepsilon_2^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{d}{dx} & 0 \\ 0 & \frac{1}{R} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_0 \\ w \end{Bmatrix}; \chi_1 = -\frac{d^2 w}{dx^2} \quad (15)$$

Из первого уравнения (14) определим:

$$\frac{du_0}{dx} = \frac{1 - \nu^2}{Eh} N_1^{cr} - \nu \frac{w}{R} \quad (16)$$

и подставим во второе уравнение (14):

$$N_2 = \frac{Ehw}{R} + \nu N_1^{cr} - N_2^{cr} \quad (17)$$

Окончательно подставив (17) и третье соотношение из (14) во второе уравнение (13) получим разрешающее уравнение относительно прогиба w :

$$D \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \frac{Ehw}{R^2} = q + q^{cr} \quad (18)$$

где

$$q^{cr} = \frac{1}{R} (N_2^{cr} - \nu N_1^{cr}) - \frac{d^2 M_1^{cr}}{dx^2}$$

Условия на границе:

$$\begin{aligned} \text{при } x = 0; \quad & w = 0; \quad \frac{dw}{dx} = 0; \\ \text{при } x = h: \quad & M_1 = -D \frac{d^2 w}{dx^2} - M_1^{cr} = 0; \\ & Q_1 = \frac{dM_1}{dx} = -D \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} - \frac{dM_1^{cr}}{dx} = 0. \end{aligned} \quad (18a)$$

Для вычисления деформаций ползучести вводится равномерная сетка по времени. Величина $\varepsilon_{i,t+\Delta t}^*$ в момент времени $(t + \Delta t)$ вычисляется на основе метода Эйлера [5]:

$$\frac{\partial \varepsilon_i^{cr}}{\partial t} \approx \frac{\varepsilon_{i,t+\Delta t}^{cr} - \varepsilon_{i,t}^{cr}}{\Delta t} \quad \Rightarrow \quad \varepsilon_{i,t+\Delta t}^* = \varepsilon_{i,t}^{cr} + \frac{\partial \varepsilon_i^{cr}}{\partial t} \Delta t. \quad (19)$$

Аналогичный подход для решения задач ползучести применяется в работах [3,8].

Решение линейного неоднородного дифференциального уравнения четвертого порядка (18) при действии осесимметричной гидростатической нагрузки, которая распределена по линейному закону (20) может быть осуществлено различными методами, в том числе и численными [1,10-12]:

$$p_3 = q = \gamma(l - x) \quad (20)$$

В данной статье рассматривается численно-аналитический метод интегрирования данного уравнения и верифицируется численным методом – методом сеток [1].

Введем безразмерную координату ξ , связанная с декартовой координатой x соотношением:

$$\xi = \psi x \quad (21)$$

Здесь ψ – физико-геометрический параметр оболочки.

$$\psi = \sqrt[4]{\frac{Eh}{4DR^2}} = \sqrt[4]{\frac{3(1 - \nu^2)}{R^2 h^2}}$$

В безразмерных координатах разрешающее уравнение (18) примет вид:

$$\frac{\partial^4 w}{\partial \xi^4} + 4w = \frac{1}{\psi^4 D} \left\{ q + \frac{1}{R} (N_2^{cr} - \nu N_1^{cr}) - \psi^2 \frac{d^2 M_1^{cr}}{d\xi^2} \right\} \quad (22)$$

При решении данной задачи удобнее, использовать линейные комбинации, так называемые функции А.Н. Крылова [10]. Запишем решение уравнения (22) как:

$$w = C_1 K_1 + C_2 K_2 + C_3 K_3 + C_4 K_4 + \bar{w}_0 + \bar{w}^{cr} \quad (23)$$

где, \bar{w}_0 – частное упругое решение (22), \bar{w}^{cr} – добавка к частному решению, вызванной ползучестью, K_1, K_2, K_3, K_4 – функции А.Н. Крылова [6].

$$\begin{aligned} K_1(\xi) &= ch\xi \cdot \cos\xi, \\ K_2(\xi) &= 0,5(ch\xi \cdot \sin\xi + sh\xi \cdot \cos\xi), \\ K_3(\xi) &= 0,5 ch\xi \cdot \cos\xi, \\ K_4 &= 0,25(ch\xi \cdot \sin\xi - sh\xi \cdot \cos\xi), \end{aligned} \quad (24)$$

Функция \bar{w}_0 может быть выражена через функции А.Н. Крылова интегралом:

$$\bar{w}_0 = \frac{1}{\psi^4 D} \int_0^\xi K_4(\xi - t) \cdot q(t) dt. \quad (25)$$

Выразим нагрузку (20) через безразмерные координаты:

$$q(\xi) = \frac{\gamma}{\psi} (\lambda - \xi), \quad \lambda = \psi l - \text{безразмерная длинна оболочки} \quad (26)$$

или с учетом (26), функция \bar{w}_0 имеет вид:

$$\bar{w}_0 = \frac{1}{4 \cdot \psi^5 \cdot D} (\lambda - \xi - \lambda K_1 + K_2) \quad (27)$$

Для функции \bar{w}^{cr} запишем:

$$\bar{w}^{cr} = \frac{1}{\psi^4 \cdot D} \int_0^\xi \left(-\psi^2 \frac{d^2 M^{cr}}{d\xi^2} \Big|_{\xi=t} + \frac{1}{R} (N_2^{cr}(t) - \nu N_1^{cr}(t)) \right) K_4(\xi - t) dt \quad (28)$$

Угол поворота записывается в виде:

$$\varphi = \frac{dw}{dx} = \psi \left(-C_1 K_4 + C_2 K_1 + C_3 K_2 + C_4 K_3 + \frac{\gamma}{4 \cdot \psi^5 \cdot D} (-1 + 4\lambda K_4 + K_1) \right) + \frac{d\bar{w}^{cr}}{dx} \quad (29)$$

Изгибающий момент определяется следующим образом:

$$\begin{aligned} M_1 &= -D \frac{d^2 w}{dx^2} - M_1^{cr} \\ &= -\psi^2 D \left(-4C_1 K_3 + C_2 K_4 + C_3 K_1 + C_4 K_2 + \frac{\gamma}{\psi^5 \cdot D} (\lambda K_3 - K_4) \right) - D \frac{d\bar{w}^{cr}}{dx} \\ &\quad - M_1^{cr} \end{aligned} \quad (30)$$

Выражение для поперечной силы принимает вид:)

$$\begin{aligned} Q_1 &= -D \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} - \frac{dM_1^{cr}}{dx} \\ &= -\psi^3 D \left(-4C_1 K_2 - 4C_2 K_3 - 4C_3 K_4 + C_4 K_1 + \frac{\gamma}{\psi^5 \cdot D} (\lambda K_2 - K_3) \right) - D \frac{d^3 \bar{w}^{cr}}{dx^3} - \frac{dM_1^{cr}}{dx} \end{aligned} \quad (31)$$

Для граничных условий запишем следующим образом. Подставим граничные условия (18а) в (23), (29) - (31), получим:

$$\begin{aligned} w(0) = 0 &\rightarrow C_1 = \bar{w}^{cr} = 0; \\ \frac{dw(0)}{dx} = 0; \psi C_2 + \frac{d\bar{w}^{cr}}{dx} \Big|_{x=0} = 0 &\rightarrow C_2 = -\frac{1}{\psi} \frac{d\bar{w}^{cr}}{dx} \Big|_{x=0} = -\frac{d\bar{w}^{cr}}{d\xi} \Big|_{\xi=0} \end{aligned} \quad (32)$$

$$\begin{aligned} M_1(\lambda) = 0: -M_1^{cr} \Big|_{x=l} - \psi^2 \\ \cdot D \left(\frac{4}{\psi} \frac{d\bar{w}^{cr}}{dx} \Big|_{x=0} K_4(\lambda) + C_3 K_1(\lambda) + C_4 K_2(\lambda) + \frac{\gamma}{\psi^5 \cdot D} (\lambda K_3(\lambda) - K_4(\lambda)) \right) \\ - D \frac{d^2 \bar{w}^{cr}}{dx^2} \Big|_{x=l} = 0; \end{aligned} \quad (33)$$

$$\begin{aligned} Q_1(\lambda) = 0: -\psi^3 \cdot D \left(\frac{4}{\psi} \frac{d\bar{w}^{cr}}{dx} \Big|_{x=0} K_3(\lambda) - 4C_3 K_4(\lambda) + C_4 K_1(\lambda) + \frac{\gamma}{\psi^5 \cdot D} (\lambda K_2(\lambda) - K_3(\lambda)) \right) \\ - D \frac{d^3 \bar{w}^{cr}}{dx^3} \Big|_{x=l} - \frac{dM_1^{cr}}{dx} \Big|_{x=l} = 0; \end{aligned}$$

Таким образом, для определения постоянных C_3 и C_4 на каждом шаге по времени имеем два уравнения с двумя неизвестными. Для определения производных

$$\frac{d\bar{w}^{cr}}{d\xi}, \frac{d^2\bar{w}^{cr}}{d\xi^2}, \frac{d^3\bar{w}^{cr}}{d\xi^3}$$

Воспользуемся приемом определения производных деформаций ползучести в [1] и приведем ее в том же виде:

$$\frac{d\bar{w}^{cr}}{d\xi} = \frac{1}{4} [e^\xi \cos\left(\xi - \frac{\pi}{4}\right) \cdot I_1 + e^\xi \sin\left(\xi - \frac{\pi}{4}\right) \cdot I_2 - e^{-\xi} \cos\left(\xi - \frac{\pi}{4}\right) \cdot I_3 - e^{-\xi} \sin\left(\xi - \frac{\pi}{4}\right) \cdot I_4], \quad (34)$$

$$\frac{d^2\bar{w}^{cr}}{d\xi^2} = \frac{1}{4} [e^\xi \cos\left(\xi - \frac{\pi}{4}\right) \cdot I_1 + e^\xi \sin\left(\xi - \frac{\pi}{4}\right) \cdot I_2 - e^{-\xi} \cos\left(\xi - \frac{\pi}{4}\right) \cdot I_3 - e^{-\xi} \sin\left(\xi - \frac{\pi}{4}\right) \cdot I_4], \quad (35)$$

$$\frac{d^3\bar{w}^{cr}}{d\xi^3} = \frac{1}{4} [e^\xi \cos\left(\xi - \frac{\pi}{4}\right) \cdot I_1 + e^\xi \sin\left(\xi - \frac{\pi}{4}\right) \cdot I_2 - e^{-\xi} \cos\left(\xi - \frac{\pi}{4}\right) \cdot I_3 - e^{-\xi} \sin\left(\xi - \frac{\pi}{4}\right) \cdot I_4], \quad (36)$$

где

$$I_1 = \int_0^\xi f(t)e^{-t} \cos\left(t + \frac{\pi}{4}\right) dt; \quad I_2 = \int_0^\xi f(t)e^{-t} \sin\left(t + \frac{\pi}{4}\right) dt;$$

$$I_3 = \int_0^\xi f(t)e^t \cos\left(t + \frac{\pi}{4}\right) dt; \quad I_4 = \int_0^\xi f(t)e^t \sin\left(t + \frac{\pi}{4}\right) dt.$$

где

$$f(t) = -\alpha^2 \frac{d^2 M^*}{d\xi^2} \Big|_{\xi=t} + \frac{1}{R} (N_\theta^*(t) - \nu N_x^*(t)).$$

Для функции \bar{w}^{cr} можно также записать:

$$\bar{w}^{cr} = \frac{\sqrt{2}}{8} \{e^\xi \sin \xi \cdot I_1 - e^\xi \cos \xi \cdot I_2 + e^{-\xi} \cos \xi \cdot I_3 + e^{-\xi} \sin \xi \cdot I_4\}. \quad (37)$$

Интегралы I_1, I_2, I_3, I_4 вычисляются численно по формуле Симпсона.

Для решения вводится сетка по координатам x и z , а также по времени t .

После определения прогибов из уравнения (18) по формулам (15) и (16) вычисляются деформации. Далее определяются напряжения по формулам (8).

Вывод. Расчет был выполнен в программном комплексе MATLAB. Для верификации правильности решения воспользуемся данными из [1].

Был выполнен расчет полимерного резервуара из вторичного ПВХ $h = 3$ см, $l = 3$ м, $R = 2$ м, $\gamma = 10$ кН/м³, $E = 1480$ МПа, $\nu = 0.3$.

Уравнение состояния принималось нелинейное уравнение Максвелла-Гуревича [9]. Реологические параметры ПВХ при температуре 20°C: модуль высокоэластичности $E_\infty = 5990$ МПа, модуль скорости $m^* = 12.6$ МПа, начальная релаксационная вязкость $\eta_0^* = 9.06 \cdot 10^5$ МПа · мин.

Оболочка по длине разбивалась на $n_x = 100$ отрезков, по толщине на $n_z = 50$ интервалов, по времени на $n_t = 100$ шагов.

В табл. 1. приведено сравнение, выполненное в [1] для верификации правильности решения.

Наибольшее расхождение результатов составляет 0.15%, что свидетельствует о их достоверности.

Таблица 1. Сравнение наибольших перемещений в различные моменты времени, полученных МКР и численно-аналитического метода (ЧАМ)
Table 1. Comparison of the largest displacements at different points in time obtained by the MKR and the numerical-analytical method (NAM)

t , час	1	2	3	4	5	6	7	8	
w , мм	8.3732	8.7825	9.0182	9.1622	9.2532	9.3118	9.3500	9.3751	
ММ	ЧАМ	8.3839	8.7946	9.0312	9.1758	9.2671	9.3260	9.3644	9.3896

На рис. 3 – 4 приведено соответственно изменение напряжений w_{max} во времени и по высоте цилиндра при $t = 10$ часов соответственно. В процессе ползучести произошло увеличение максимального прогиба на 23,5%. Рост кольцевых напряжений в основании объясняется ростом по абсолютному значению кольцевого изгибающего момента, график изменения которого во времени приведен на рис. 4.

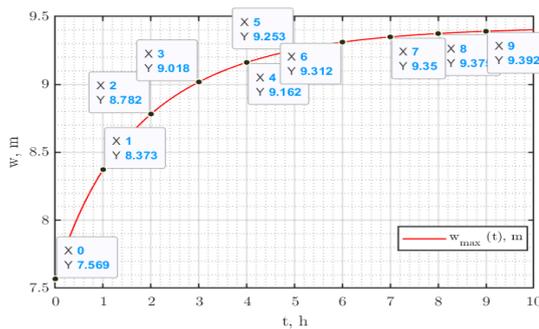


Рис. 3. График роста максимального прогиба во времени (численно-аналитический расчет)
Fig. 3. Graph of the growth of the maximum deflection over time (numerical-analytical calculation)

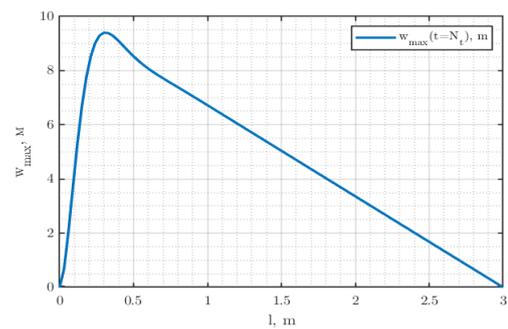


Рис. 4. График изменение максимального прогиба w_{max} по высоте цилиндра при $t = 10$ часов
Fig. 4. Graph of the change in the maximum deflection w_{max} along the height of the cylinder at $t=10$ hours

На рис. 5 приведено соответственно изменение напряжений σ_1 и σ_2 в основании при $z = -h/2$. Из представленных графиков видно, что напряжения σ_x остаются практически постоянными, а напряжения выросли на 14,8%.

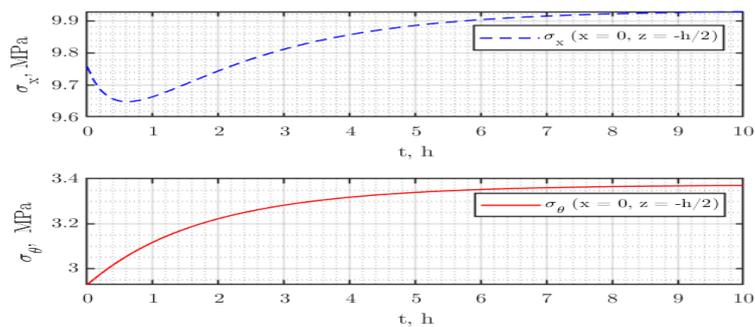


Рис. 5. График изменения напряжений $\sigma_1 = \sigma_x$ и $\sigma_2 = \sigma_\theta$ во времени
Fig. 5. Graph of changes in stresses $\sigma_1 = \sigma_x$ and $\sigma_2 = \sigma_\theta$ over time

Таким образом, расчет оболочки только в упругой стадии приводит к заниженным значениям напряжений, и как следствие возможному ее разрушению в процессе эксплуатации.

Библиографический список:

1. Чепурненко А.С., Сайбель А.В., Савченко А.А. Расчет круговой цилиндрической оболочки по моментной теории с учетом ползучести // Инженерный вестник Дона, 2015, № 2.
2. Самуль В.И. Основы теории упругости и пластичности. М.: Высшая школа, 1982. 264 с.
3. Andreev V.I., Yazyev B.M., Chepurnenko A.S. On the bending of a thin polymer plate at nonlinear creep // Advanced Materials Research. 2014. Vol. 900. pp. 707-710.
4. Andreev V.I., Chepurnenko A.S., Yazyev B.M. Energy method in the calculation stability of compressed polymer rods considering creep // Advanced Materials Research. 2014. Vol. 1004-1005. pp. 257-260.

5. Языев Б.М., Чепурненко А.С., Литвинов С.В., Козельская М.Ю. Напряженно-деформированное состояние предварительно напряженного железобетонного цилиндра с учетом ползучести бетона // Научное обозрение. 2014. № 11. С. 759-763.
6. Монахов В.А. Теория пластин и оболочек. Пенза: ПГУАС, 2016. 252 с.
7. Chepurnenko A.S., Yazyev B.M., Savchenko A.A. Calculation for the circular plate on creep considering geometric nonlinearity // Procedia Engineering. 2016. Vol. 150. pp. 1680–1685.
8. Babu Gunda J., Gandule R. New rational interpolation functions for finite element analysis of rotating beams. International Journal of Mechanical Sciences. 2008; 50(3.): 578-588.
9. Крылов А.Н. О расчете балок, лежащих на упругом основании. М.: Академия наук СССР. 1931. 80 с.
10. Лалин В. В., Колосова Г. С. Численные методы в строительстве. СПб. Изд-во СПбГТУ, 2001. 71 с.
11. Lou T., Xiang Y. Numerical analysis of second-order effects of externally prestressed concrete beams // Structural engineering and mechanics. 2010. v. 35. №5. P. 631-643.
12. Milind T. R., Date P. P. Analytical and finite element modeling of strain generated in equal channel angular extrusion // International Journal of Mechanical Sciences. 2012. V. 56. № 1. P. 26-34.

References:

1. Chepurnenko A.S., Saibel A.V., Savchenko A.A. Calculation of a circular cylindrical shell using the moment theory taking into account creep. *Engineering Bulletin of the Don*, 2015;2. (In Russ)
2. Samul V.I. Fundamentals of the Theory of Elasticity and Plasticity. Moscow: Vysshaya shkola, 1982;264 (In Russ)
3. Andreev V.I., Yazyev B.M., Chepurnenko A.S. On the bending of a thin polymer plate at nonlinear creep. *Advanced Materials Research*. 2014; 900:707-710.
4. Andreev V.I., Chepurnenko A.S., Yazyev B.M. Energy method in the calculation stability of compressed polymer rods considering creep. *Advanced Materials Research*. 2014; 1004-1005: 257-260.
5. Yazyev B.M., Chepurnenko A.S., Litvinov S.V., Kozelskaya M.Yu. Stress-strain state of prestressed reinforced concrete cylinder taking into account concrete creep. *Scientific Review*. 2014;11:759-763 (In Russ)
6. Monakhov V.A. Theory of plates and shells. Penza: PSUAS, 2016;252 (In Russ)
7. Chepurnenko A.S., Yazyev B.M., Savchenko A.A. Calculation for the circular plate on creep considering geometric nonlinearity. *Procedia Engineering*. 2016;150:1680–1685.
8. Babu Gunda J., Gandule R. New rational interpolation functions for finite element analysis of rotating beams. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2008; 50(3): 578-588.
9. Krylov A. N. On the calculation of beams lying on an elastic foundation. Moscow: USSR Academy of Sciences. 1931;80. (In Russ)
10. Lalin V. V., Kolosova G. S. Numerical methods in construction. St. Petersburg: Publishing House of St. Petersburg State Technical University, 2001;71. (In Russ)
11. Lou T., Xiang Y. Numerical analysis of second-order effects of externally prestressed concrete beams. *Structural engineering and mechanics*. 2010;35(5): 631-643.
12. Milind T. R., Date P. P. Analytical and finite element modeling of strain generated in equal channel angular extrusion. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2012;56.(1): 26-34.

Сведения об авторах:

Магомедов Марсель Айдемирович, аспирант кафедры «Строительная механика»; marsmag05@ya.ru.
ORCID 0000-0001-5517-919X

Кузнецов Владимир Вячеславович, соискатель; ibm2225101@gmail.com. ORCID0009-0009-3688-4737
Языев Батыр Меретович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Строительная механика и теория сооружений»; ps62@yandex.ru; ORCID 0000-0002-5205-1446

Литвинов Степан Викторович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Строительная механика и теория сооружений»; ps62@yandex.ru; ORCID 0000-0001-5729-1425,

Information about authors:

Marcel A. Magomedov, Postgraduate, Department of Structural Mechanics; marsmag05@ya.ru
ORCID 0000-0001-5517-919X;

Vladimir V. Kuznetsov, Applicant; ibm2225101@gmail.com. ORCID 0009-0009-3688-4737

Batyr M. Yazyev, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Prof., Department of Structural Mechanics and Theory of Structures; ps62@yandex.ru ; ORCID 0000-0002-5205-1446

Stepan V. Litvinov, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Assoc. Prof., Department of Structural Mechanics and Theory of Structures; ps62@yandex.ru ; ORCID 0000-0001-5729-1425,

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/ Received 25.09.2024.

Одобрена после рецензирования / Revised 28.10.2024.

Принята в печать / Accepted for publication 10.11.2024.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 691.53

DOI: 10.21822/2073-6185-2024-51-4-201-208



Оригинальная статья /Original article

Комплексное модифицирование бетонных композитов

С-А.Ю. Муртазаев^{1,2}, М.Ш. Саламанова^{1,2}

¹Грозненский государственный нефтяной технический университет
имени академика М.Д. Миллионщикова,

¹364051, г. Грозный, пр. Исаева, 100, Россия,

²Комплексный научно-исследовательский институт имени Х.И. Ибрагимова
Российской академии наук,

²364051, г. Грозный, В.Алиева (Старопромысловское шоссе), 21а, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является комплексное изучение механизма протекания химических взаимодействий с последующим формированием новообразований в структуре бетонного камня; нераскрытые возможности модификации матричной системы органическими и минеральными добавками; разработки наполненных высокоактивных вяжущих материалов; применение обогащенных заполнителей повышенного качества; сочетание бетона, арматуры и дисперсного армирования и др. технологических приемов, способствующих эволюции развития современного бетоноведения. **Метод.** Исследования проводились согласно нормативным документам ГОСТ 12730.3–2020 Бетоны. Методы определения водопоглощения; ГОСТ 10180-2012 Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам; ГОСТ 12730.1-78 Бетоны. Методы определения плотности. **Результат.** Исследовалось комплексное использование органических и минеральных добавок, что способствовало ускоренному формированию структуры и прочности камня без применения теплового воздействия. Зафиксировано улучшение реотехнологических характеристик, установлен водоредуцирующий эффект, увеличение сохраняемости бетонной смеси, что не мало важно при бетонировании крупногабаритных конструкций, или транспортировке полуфабриката на дальние расстояния. **Вывод.** Предлагаемые результаты исследований позволят с успехом реализовывать проекты мирового значения, создавая устойчивые, прочные и долговечные бетонные конструкции.

Ключевые слова: минеральные порошки, суперпластификатор, бетонный лом, опока, микрокремнезем, вулканический пепел, заполнитель, структура, прочность

Для цитирования: С-А.Ю. Муртазаев, М.Ш. Саламанова. Комплексное модифицирование бетонных композитов. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2024; 51(4): 201-208. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-4-201-208

Complex modification of concrete composites

S-A.Yu. Murtazaev^{1,2}, M.Sh. Salamanova^{1,2}

¹M.D. Millionshchikov Grozny State Oil Technical University,

¹100 Kh. Isaev Ave., Grozny 364051, Russia,

²Kh. Ibragimov Complex Institute of the Russian Academy of Sciences,

²21a V. Aliyeva (Staropromyslovskoe) highway, Grozny 364051, Russia

Abstract. Objective. The aim of the study is to study the mechanism of chemical interactions with subsequent formation of new formations in the structure of concrete stone; undisclosed possibilities of modifying the matrix system with organic and mineral additives; development of filled highly active binders; use of enriched fillers of high quality; a combination of concrete, reinforcement and dispersed reinforcement, contributing to the evolution of the development of modern concrete science. **Method.** Research is carried out in accordance with regulatory documents GOST 12730.3–2020 Concrete. Methods for determining water absorption;

GOST 10180-2012 Concrete. Methods for determining hardness using control samples; GOST 12730.1-78 Concrete. Methods for determining definition. **Result.** The complex use of organic and mineral additives was studied, which contributed to the accelerated formation of the structure and strength of the stone without the use of heat. An improvement in rheotechnological characteristics has been recorded, a water-reducing effect has been established, and an increase in the shelf life of the concrete mixture has been established, which is no less important when concreting large-sized structures or transporting semi-finished products over long distances. **Conclusion.** The proposed research results will make it possible to successfully implement projects of global importance, creating stable, strong and durable concrete structures.

Key words: mineral powders, superplasticizer, concrete scrap, flask, microsilica, volcanic ash, filler, structure, strength

For citation: S-A.Yu. Murtazaev, M.Sh. Salamanova. Complex modification of concrete composites. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2024;51(4): 201-208. DOI:10.21822 /2073-6185-2024-51-4-201-208

Введение. В настоящее время современные технологии бетона претерпели радикальные изменения и сделали этот материал одним из самых востребованных и незаменимых в строительстве. Предпосылками создания новых композитов послужили более глубокие исследования механизма протекания химических взаимодействий с последующим формированием новообразований в структуре бетонного камня; нераскрытые возможности модификации матричной системы органическими и минеральными добавками; разработки наполненных высокоактивных вяжущих материалов; применение обогащенных заполнителей повышенного качества; сочетание бетона, арматуры и дисперсного армирования и др. технологических приемов [1–4]. Правильный выбор рецептов бетонных композиций играет ключевую роль в успешной реализации проектов мирового значения, являясь гарантом прочности, долговечности и устойчивости конструкций. В зависимости от конкретной задачи, необходимо моделировать составы и технологию бетона определенного класса, обладающего определенными свойствами и особенностями формования в конструкции.

Постановка задачи. Для возведения жестких каркасов высотных зданий и сооружений, мостов и др. ответственных участков проектируют High-Strength Concrete (высокопрочный бетон) с прочностью до 150 МПа; Ultra High-Strength Concrete (сверхпрочный бетон) с прочностью выше 150 МПа находит применение при строительстве ответственных конструктивных элементов объектов; непроницаемые и плотные бетоны W12 и выше нашли свое признание при строительстве подземных частей зданий и сооружений, тоннелей; монолитные массивных размеров конструкции делают из бетона Shrinkage Compensated Concrete, во избежание деформативных нарушений; бетонирование густоармированных сложной конфигурации конструкций успешно проводят используя самоуплотняющиеся бетоны – Self-Compacting Concrete, что позволяет отказаться от уплотнения; ограждающие конструкции и мелкоштучные элементы можно изготавливать – Reactive Powder Concrete (порошковые бетоны) и Macro Defect-Free Concrete (мелкозернистые бетоны без дефектов), для которых характерна минимальная пористость до 1 % и достаточно высокая прочность в пределах 150 – 250 МПа. Перечисленные бетоны нового поколения демонстрируют сильные стороны инновационного материала, и являются предметом обсуждения практически на многих научных площадках мирового масштаба.

Моделируя рецепты многокомпонентных бетонов, введением в систему модификаторов различной природы, можно управлять структурообразованием, начиная с процессов диспергирования твердой фазы в воде до формирования прочного кристаллического тела в итоге. Проблемы экологического порядка, связанные с декарбонизацией экономики, и в частности, строительного сектора, наталкивают на расширение номенклатуры вяжущих материалов за счет частичного использования техногенных отходов взамен доро-

гой и ресурсоемкой клинкерной составляющей. Применяя в качестве заполнителя рециркулированный продукт, полученный при переработке фрагментов разрушенных бетонных зданий и сооружений, возможно решать вопросы растущего дефицита природного ископаемого сырья [5–8].

Таким образом, все перечисленные технологические подходы для получения качественных многокомпонентных бетонов позволят воплощать в жизнь новые архитектурные решения, требующие реализации всех нераскрытых резервов этого уникального материала. С целью получения бетонов линейки классов В25-В40 разрабатывались составы вяжущих веществ и композитов, с использованием минеральных добавок из бетонного лома, микрокремнезема, вулканического пепла, опоки. Были рассмотрены попытки применения рециркулированного крупного заполнителя от разборки разрушенных зданий для получения класса бетона В25. Ну и конечно же в комплексе с минеральными добавками с водой затворения в смесь вводились водорастворимые органические вещества, что позволило управлять реотехнологическими свойствами, коллоидными, физическими и химическими явлениями, модифицируя структуру на микро- и макроуровнях [9–11].

Методы исследования. Согласно терминологии, ГОСТ 31108 – 2020 Цементы общестроительные. Технические условия, минеральные добавки, применяемые в исследованиях можно отнести к группе пуццолановых, так как в присутствии СаО указанные порошки будут проявлять гидравлическую активность, к тому же не оказывают негативного влияния на водопотребность цементного теста и прочностные характеристики. Куски горной породы осадочного происхождения – опоки, предварительно пропускали через щековую дробилку, для последующего тонкого измельчения в мелющем агрегате. Минеральные добавки (растворная часть бетонного лома, вулканический пепел и опока) готовились измельчением в лабораторной роликовой мельнице МЛР-15 в течение 10 минут. Удельная поверхность полученных порошков определялась на приборе ПСХ-12 и составила следующие числовые показатели: $S_{уд}$ бетонного лома $571 \text{ м}^2/\text{кг}$; $S_{уд}$ вулканического пепла $542 \text{ м}^2/\text{кг}$; $S_{уд}$ опоки $592 \text{ м}^2/\text{кг}$. Добавка микрокремнезема в естественном виде обладает высокой удельной поверхностью и составляла $21000 \text{ м}^2/\text{кг}$. Основным носителем вяжущих свойств является портландцемент марки ЦЕМ I 42,5Н, завод производитель АО «Чеченцемент», на момент испытаний активность цемента, определенная с помощью индикатора активности ИАЦ-04М составила 48,4 МПа.

В качестве мелкого и крупного заполнителей использовался инертный материал Алагирского карьера из гранитно-диабазовых пород. Кварцевый песок имеет стабильный гранулометрический состав относится к классу крупных, модуль крупности составил 2,9, содержание ПГИ – 0,82 %, насыпная плотность – $1470 \text{ кг}/\text{м}^3$. Щебень фр. 5–20 мм соответствует требованиям ГОСТ8267–93 Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия, марка по дробимости М1000, содержание ПГИ – 0,61 %, морозостойкость F 300, насыпная плотность $1480 \text{ кг}/\text{м}^3$. Для получения бетонов класса В25 использовался рециркулированный крупный заполнитель фр. 5–20 мм, имеющий примерно 10–15 % доли растворной части, что только усилит контактную прочность в зоне «вяжущее – рециркулированный щебень» и положительно отразится на прочности бетона в целом. Особое внимание в работе уделялось органической составляющей, в подборках рецептур бетона исследовались различные современные модификаторы, как отечественного, так и импортного производителя, доступные и примерно одной стоимости. Исследуемые химические добавки обладают суперводоредуцирующим эффектом, комплексным составом на основе поликарбоксилатов и лигносульфонатов, за счет снижения водоцементного отношения, увеличивают прочность на 20 – 25 %. Дозировка суперпластификатора выбиралась с учетом рекомендаций производителя и изменялась в пределах от 0,1 – 1,8 % от массы цемента. В качестве органического модификатора были исследованы следующие добавки: RHEOPLAST LS 01 (ООО «Реопласт», г. Всеволожск), Stark EW (Starkhaus, Германия), уплотняющая добавка МегаХимТрейд (ООО «МегаХимТрейд»,

г. Тула), Криопласт (ООО Полипласт, г. Новомосковск), Stark PM (Starkhaus, Германия), ТЕХНОНИКОЛЬ ICE 611 и ТЕХНОНИКОЛЬ READY-MIX 111 (корпорация ТЕХНОНИКОЛЬ).

Обсуждение результатов. С использованием выше перечисленных сырьевых материалов было проведено большое количество экспериментальных замесов бетонных смесей и изготовлены и испытаны образцы, в результате чего установлены оптимальные дозировки для всех исследуемых добавок. Составы проектируемых бетонов и результаты испытаний приводятся в таблицах 1, 2.

Таблица 1. Составы модифицированных бетонов

Table 1. Compositions of modified concretes

Соста- вы	СП и дозировка	В/Ц	Расход, кг на 1 м ³ бетона								
			Ц	В	Щ	П	БЛ	МК	ВП	ОП	Д
Бетон класса В25 (М350) ЦЕМ I 42,5Н/ Concrete class В25 (М350) CEM I 42.5N											
1	RHEOPLAST LS 01 (0,9%)	0,52	340	176	1070	830	30	11	-	-	3,0
2	Stark EW (0,9%)	0,52	340	176	1070	830	30	11	-	-	3,0
3	МегаХимТрейд (1,0%)	0,52	340	176	1070	830	30	11	-	-	3,4
4	Криопласт (0,9%)	0,52	340	176	1070	830	30	11	-	-	3,0
5	Stark PM (0,9%)	0,52	340	176	1070	830	30	11	-	-	3,0
6	ТехноНИКОЛЬ ICE 611 (1,0%)	0,52	340	176	1070	830	30	11	-	-	3,4
7	ТехноНИКОЛЬ READY-MIX 111 (1,0%)	0,52	340	176	1070	830	30	11	-	-	3,4
Бетон класса В35 (М450) ЦЕМ I 42,5Н/ Concrete class В35 (М450) CEM I 42.5N											
8	RHEOPLAST LS 01 (1,1%)	0,34	410	140	1100	745	-	-	25	25	4,5
9	Stark EW (1,1%)	0,34	410	140	1100	745	-	-	25	25	4,5
10	МегаХимТрейд (1,1%)	0,34	410	140	1100	745	-	-	25	25	4,5
11	Криопласт (1,1%)	0,34	410	140	1100	745	-	-	25	25	4,5
12	Stark PM (1,1%)	0,34	410	140	1100	745	-	-	25	25	4,5
13	ТехноНИКОЛЬ ICE 611 (1,1%)	0,34	410	140	1100	745	-	-	25	25	4,5
14	ТехноНИКОЛЬ READY-MIX 111 (1,1%)	0,34	410	140	1100	745	-	-	25	25	4,5
Бетон класса В40 ЦЕМ I 42,5Н/ Concrete class В40 CEM I 42.5N											
15	RHEOPLAST LS 01 (1,1%)	0,32	460	148	980	750	-	10	30	-	5,0
16	Stark EW (1,1%)	0,32	460	148	980	750	-	10	30	-	5,0
17	МегаХимТрейд (1,1%)	0,32	460	148	980	750	-	10	30	-	5,0
18	Криопласт (1,1%)	0,32	460	148	980	750	-	10	30	-	5,0
19	Stark PM (1,1%)	0,32	460	148	980	750	-	10	30	-	5,0
20	ТехноНИКОЛЬ ICE 611 (1,1%)	0,32	460	148	980	750	-	10	30	-	5,0
21	ТехноНИКОЛЬ READY-MIX 111 (1,1%)	0,32	460	148	980	750	-	10	30	-	5,0

Примечание: Ц – цемент; В – вода; Щ – щебень; П – песок; Д – добавка; БЛ – наполнитель из бетонного лома; М – микрокремнезем; ОП – опока; ВП – вулканический пепел; R_{сж} – прочность на сжатие; РК – расплыв конуса; ρ_б – плотность бетона.

Note: C – cement; W – water; Щ – crushed stone; P – sand; D – additive; BL – concrete scrap filler; M – microsilica; OP – opoka; VP – volcanic ash; R_{сж} – compressive strength; PK – cone spread; ρ_б – concrete density.

Таблица 2. Свойства модифицированных бетонов
Table 2. Properties of modified concrete

составы	СП и дозировка	ρ_b , кг/м ³	R _{сж} в возрасте, сут., МПа		Водопогло- щение, %	ПК, см
			7	28		
Бетон класса В25 (М350) ЦЕМ I 42,5Н/ Concrete class B25 (M350) CEM I 42.5N						
1	RHEOPLAST LS 01 (0,9%)	2326	31,8	42,8	6,4	65
2	Stark EW (0,9%)	2340	34,5	45,2	6,1	67
3	МегаХимТрейд (1,0%)	2371	34,3	43,8	6,3	66
4	Криопласт (0,9%)	2372	36,2	46,8	5,9	68
5	Stark PM (0,9%)	2337	29,5	41,1	6,6	64
6	ТехноНИКОЛЬ ICE 611 (1,0%)	2308	29,1	41,4	6,6	64
7	ТехноНИКОЛЬ READY-MIX 111 (1,0%)	2331	35,9	46,9	6,0	67
Бетон класса В35 (М450) ЦЕМ I 42,5Н /Concrete class B35 (M450) CEM I 42.5N						
8	RHEOPLAST LS 01 (1,1%)	2330	42,3	46,9	6,3	72
9	Stark EW (1,1%)	2342	44,6	49,2	6,0	73
10	МегаХимТрейд (1,1%)	2373	44,1	47,8	6,2	74
11	Криопласт (1,1%)	2378	48,5	52,9	5,7	75
12	Stark PM (1,1%)	2338	39,6	46,0	6,5	70
13	ТехноНИКОЛЬ ICE 611 (1,1%)	2310	38,4	45,9	6,5	69
14	ТехноНИКОЛЬ READY-MIX 111 (1,1%)	2339	47,5	51,2	5,8	75
Бетон класса В40 ЦЕМ I 42,5Н / Concrete class B40 CEM I 42.5N						
15	RHEOPLAST LS 01 (1,1%)	2332	52,9	54,0	6,2	73
16	Stark EW (1,1%)	2344	53,8	55,0	5,8	74
17	МегаХимТрейд (1,1%)	2376	53,2	54,9	6,1	74
18	Криопласт (1,1%)	2380	55,3	61,2	5,2	75
19	Stark PM (1,1%)	2340	48,0	51,2	6,4	71
20	ТехноНИКОЛЬ ICE 611 (1,1%)	2320	46,5	51,0	6,4	70
21	ТехноНИКОЛЬ READY-MIX 111 (1,1%)	2341	54,2	58,6	5,6	75

В составах 1 – 7 использовался рециркулированный крупный заполнитель фр. 5–20 мм, минеральный наполнитель из бетонного лома и добавка микрокремнезема.

В составах 8–21 использовался качественный щебень из гранитно-диабазовых магматических пород фракции 5 –20 мм. Модификация цементного камня минеральными и органическими добавками благоприятно отразилась на реотехнологических свойствах бетонной смеси и прочностных показателях бетонных образцов. Минеральные порошки из бетонного лома, опоки, вулканического пепла и микрокремнезема позволили снизить расход портландцемента.

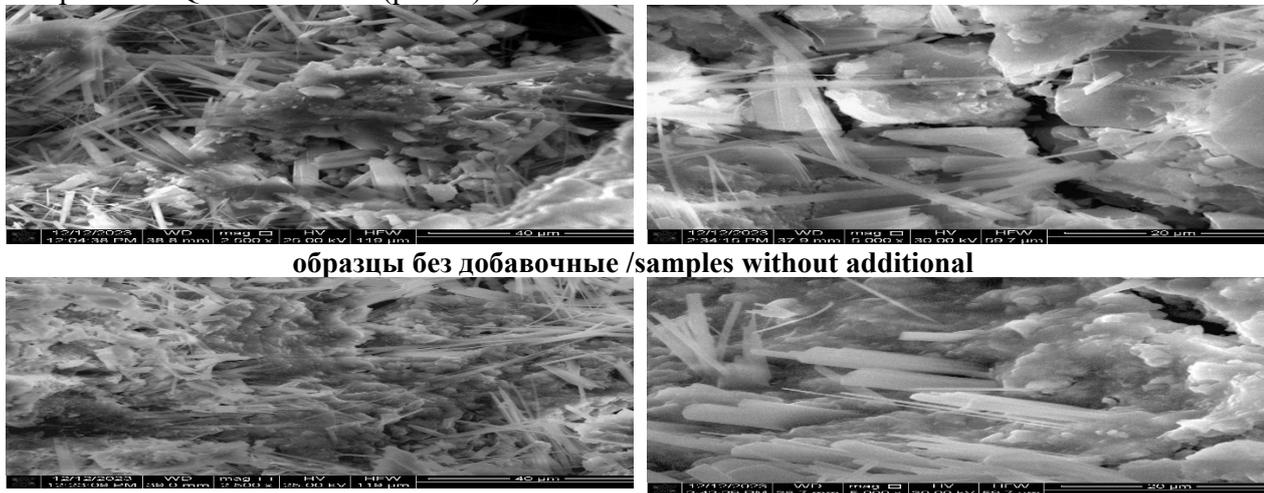
По полученным результатам наиболее выгодной комбинацией бинарных порошков является «вулканический пепел – микрокремнезем», добавки являются продуктом тепловой обработки, как естественных, так и искусственных. Минералогия и дисперсность частиц этих добавок способствовала достижению с запасом проектной прочности, снижению пористости и улучшению реологии смеси. Добавки Криопласт и ТехноНИКОЛЬ READY-MIX 111 в дозировке 1,1 % от массы цемента в пересчете на сухое вещество, создают в среде эффект дефлокуляции, повышают поверхность контакта зерен цемента с водой затворения, что положительно отразилось на росте числа новообразований. Чис-

ловые значения предела прочности на сжатие образцов бетона в 7 суточном возрасте этому подтверждение, наблюдается прирост прочностных показателей 104 – 106% от марочной.

Использование органоминеральных добавок способствовало ускоренному формированию структуры и прочности камня без применения теплового воздействия.

Все исследуемые суперпластификаторы проявляют в комплексе электростатический и стерический механизм действия, молекулы эфира поликарбоксилата адсорбируются на активных центрах кристаллизации цемента и минерального порошка, снижают внутреннее трение, поверхностное натяжение между твердой и жидкой фазой, интенсифицируют диспергацию частиц. Необходимо отметить, что помимо водоредуцирующего эффекта присутствовала сохраняемость бетонной смеси, что не мало важно при бетонировании крупногабаритных конструкций, или транспортировке полуфабриката на дальние расстояния.

Разработанные составы бетонов классов В25, В35 и В40 практически все соответствуют заявленной прочности. Для более глубокого анализа влияния комплексной модификации цементного камня, образцы бетона состава №11 с использованием вяжущей связки «портландцемент – вулканический пепел – опока» и добавки Криопласт (1,1 % от массы цемента) на 7 сутки твердения исследовались на растровом электронном микроскопе Quanta 200 3D (рис. 1).



образцы без добавочные /samples without additional

Образцы, модифицированные органоминеральными добавками/ samples modified with organomineral additives

Рис. 1. Микрофотографии исследуемых образцов, увелич. 2500, 5000 крат
Fig.1. Microphotographs of the studied samples, magnified. 2500, 5000 times

Сравнивая микрофотографии образцов 7 суточного возраста твердения без добавочных и с органоминеральной добавкой можно наблюдать заметное уплотнение структуры цементного камня, и это происходит за счет дополнительного источника преобразований, взаимодействие гексагональных кристаллов портландита с аморфной составляющей тонкодисперсного порошка, влечет к формированию трубчатых и игольчатых гидратных образований. Комплексная модификация матрицы цементного камня приводит к повышению прочностных показателей бетона, и это благодаря усиленному синтезу гидратных соединений силикатов, алюминатов, сульфоалюминатов и алюмоферритов кальция в теле бетонного композита [13–16].

Вывод. Современные преобразования, предусматривающие количественное и качественное расширение компонентов состава бетона: цемент, несколько видов минеральных порошков, органические добавки, качественные заполнители и эффективные технологические приемы приготовления смесей, открывают новые возможности в бетоневедении, и это без увеличения расхода энергоемкого портландцемента, наоборот использование пуццолановых добавок позволит развивать природоохранные технологии и управлять свойствами композитов в нужном направлении [17–19]. Использование многокомпонентных формовочных смесей, с повышенным содержанием аморфной составляющей и химического модификатора, снижает расход воды затворе-

ния, способствует сложным химическим преобразованиям с формированием плотной и непроницаемой структуры, интенсивному набору прочности бетонов и многих важных показателей. Предлагаемые в работе результаты исследований позволят с успехом реализовывать проекты мирового значения, создавая устойчивые, прочные и долговечные бетонные конструкции.

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-69-00043, <https://rscf.ru/project/24-69-00043/>

Acknowledgments. The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 24-69-00043, <https://rscf.ru/project/24-69-00043/>

Библиографический список:

1. Травуш В.И., Кузеванов Д.В., Каприелов С.С., Волков Ю.С. Бетон как экологический фактор снижения углеродного следа в среде обитания // Бетон и железобетон. – 2022. – №3 (611). – С. 10-14.
2. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Чилин И.А. Оптимизация параметров технологии бетона для обеспечения термической трещиностойкости массивных фундаментов // Строительные материалы. – 2022. – №10. – С. 41-51.
3. Нелюбова В.В., Усиков С.А., Строкова В.В., Нецвет Д.Д. Состав и свойства самоуплотняющегося бетона с использованием комплекса модификаторов // Строительные материалы. – 2021. – №12. – С. 48-54.
4. Strokova V.V., Nikulina M.V., Baskakov P.S., Abzalilova A.V., Esina A.Y. Influence of a hydrophobic emulsion on the surface properties of coatings of water-dispersion acrylic paint. Materials Science Forum. 2021 1040 MSF: 165-171.
5. Маилян Д.Р., Несветаев Г.В., Коллеганов Н.А. К определению трещиностойкости железобетонных балок из различных видов бетонов // Инженерный вестник Дона. – 2023. – №1(97). – С. 533-548.
6. Cherpurnenko A.S., Nesvetaev G.V., Koryanova Yu.I., Yazhev V.M. Simplified model for determining the stress-strain state in massive monolithic foundation slabs during construction // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2022. (18 (3)): 126-136.
7. Lesovik V.S., Popov D.Yu., Fediuk R.S., Usanova K.Iu. Composite binders with superabsorbent polymers // Construction of Unique Buildings and Structures. 2023 (3(108)): 10803.
8. Alaskhanov A.Kh., Lesovik V.S., Tolstoy A. "Green" composites based on technogenic raw materials // AIP Conference Proceedings. 2023. 153-158.
9. Баженов Ю.М., Демьянова В.С., Калашников В.И. Модифицированные высококачественные бетоны // Москва: Ассоциация строительных вузов. 2006. 289 с.
10. Калашников В.И. Промышленность нерудных строительных материалов и будущее бетонов // Строительные материалы. – 2008. – №3. – С. 20-24.
11. Муртазаев С-А. Ю., Саламанова М.Ш. Перспективы использования термоактивированного сырья алюмосиликатной природы // Приволжский научный журнал. – 2018. – Т. 46. – № 2. – С. 65–70.
12. Каприелов С.С. Модифицированные высокопрочные бетоны классов В80 и В90 в монолитных конструкциях. // Строительные материалы. – 2008. – №3. – С.9-13.
13. Саламанова М.Ш., Сайдумов М.С., Муртазаева, Т.С-А., Хубаев М. С-М. Высококачественные модифицированные бетоны на основе минеральных добавок и суперпластификаторов различной природы // Инновации и инвестиции. 2015. – №8. – С. 159-163.
14. Муртазаев С-А.Ю., Саламанова М.Ш., Алиев С.А., Бисултанов Р.Г. Горные породы вулканического происхождения как заполнители для получения легких бетонов // Научное обозрение. 2015 №7. С. 105-113.
15. Саламанова М.Ш., Бисултанов Р.Г., Мовсулов М.М. Перспективные возможности получения качественных мелкозернистых композитов // Научно-технический журнал Вестник ГГНТУ. Технические науки. 2023. Том XIX. №2(32). С. 94–101.
16. Муртазаев С-А.Ю., Саламанова М.Ш., Корянова Ю.И. Разработка полиморфной вяжущей системы на основе карбонатной добавки // Научно-технический журнал Вестник ГГНТУ. Технические науки. 2023. Том XIX. №3(33). С. 96–103.
17. Yang J., Qu D., Hu J., Song L., Cheng B. Research on singular value detection method of concrete dam deformation monitoring. Measurement. 2021. Vol.179: 109457.
18. Chen J., Jia Q., Xu S., Fan P., The PDEM-based time-varying dynamic reliability analysis method for a concrete dam subjected to earthquake. Structures. 2021. Vol. 33: 2964-2973.
19. Gowripalan N., Shakor P., Rocker P. Pressure exerted on formwork by self-compacting concrete at early ages: A review. Case Studies in Construction Materials. 2021. Vol.15: 00642.

References:

1. Travush V.I., Kuzevanov D.V., Kapriyelov S.S., Volkov Yu.S. Concrete as an environmental factor in reducing the carbon footprint in the environment. *Concrete and reinforced concrete*. 2022;3 (611):10-14. (In Russ)

2. Kaprielov S.S., Sheinfeld A.V., Chilin I.A. Optimization of concrete technology parameters to ensure thermal crack resistance of massive foundations. *Construction materials*. 2022;10: 41-51. (In Russ)
3. Nelyubova V.V., Usikov S.A., Strokova V.V., Netsvet D.D. Composition and properties of self-compacting concrete using a complex of modifiers. *Construction materials*. 2021;12: 48-54. (In Russ)
4. Strokova V.V., Nikulina M.V., Baskakov P.S., Abzalilova A.V., Esina A.Y. Influence of a hydrophobic emulsion on the surface properties of coatings of water-dispersion acrylic paint. *Materials Science Forum*. 2021 1040 MSF: 165-171.
5. Mailyan D.R., Nesvetaev G.V., Kolleganov N.A. To determine the crack resistance of reinforced concrete beams from various types of concrete. *Engineering Bulletin of the Don*. 2023; 1(97): 533-548. (In Russ)
6. Chepurnenko A.S., Nesvetaev G.V., Koryanova Yu.I., Yazyev B.M. Simplified model for determining the stress-strain state in massive monolithic foundation slabs during construction. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2022; 18 (3): 126-136.
7. Lesovik V.S., Popov D.Yu., Fediuk R.S., Usanova K.Iu. Composite binders with superabsorbent polymers. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2023; 3(108): 10803.
8. Alaskhanov A.Kh., Lesovik V.S., Tolstoy A. "Green" composites based on technogenic raw materials. *AIP Conference Proceedings*. 2023;153-158.
9. Bazhenov Yu.M., Demyanova V.S., Kalashnikov V.I. Modified high-quality concrete. Moscow: Association of Construction Universities. 2006; 289. (In Russ)
10. Kalashnikov V.I. Industry of non-metallic building materials and the future of concrete. *Construction materials*. 2008; 3: 20-24. (In Russ)
11. Murtazaev S.A. Yu., Salamanova M.Sh. Prospects for the use of thermally activated raw materials of aluminosilicate nature. *Volga Scientific Journal*. 2018;46(2): 65–70. (In Russ)
12. Kaprielov S.S. Modified high-strength concrete of classes B80 and B90 in monolithic structures. *Construction Materials*. 2008; 3:9-13. (In Russ)
13. Salamanova M.Sh., Saidumov M.S., Murtazaeva, T.S-A., Khubaev M. S-M. High-quality modified concrete based on mineral additives and superplasticizers of various natures. *Innovations and investments*. 2015; 8:159-163. (In Russ)
14. Murtazaev S.A.Yu., Salamanova M.Sh., Aliev S.A., Bisultanov R.G. Rocks of volcanic origin as fillers for producing lightweight concrete. *Scientific review*. 2015;7:105-113. (In Russ)
15. Salamanova M.Sh., Bisultanov R.G., Movsulov M.M. Promising possibilities for producing high-quality fine-grained composites. *Scientific and technical journal Vestnik GGNTU. Technical science*. 2023; XIX. . 2(32):. 94–101. (In Russ)
16. Murtazaev S-A.Yu., Salamanova M.Sh., Koryanova Yu.I. Development of a polymorphic binder system based on a carbonate additive. *Scientific and technical journal Vestnik GGNTU. Technical science*. 2023; XIX.;3(33): 96–103. (In Russ)
17. Yang J., Qu D., Hu J., Song L., Cheng B. Research on singular value detection method of concrete dam deformation monitoring. *Measurement*. 2021;179: 109457.
18. Chen J., Jia Q., Xu S., Fan P., The PDEM-based time-varying dynamic reliability analysis method for a concrete dam subjected to earthquake. *Structures*. 2021; 33: 2964-2973.
19. Gowripalan N., Shakor P., Rocker P. Pressure exerted on formwork by self-compacting concrete at early ages: A review. *Case Studies in Construction Materials*. 2021;15:00642.

Сведения об авторах:

Муртазаев Саид-Альви Юсупович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии строительного производства; s.murtazaev@mail.ru

Саламанова Мадина Шахидовна, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры технологии строительного производства, директор НТЦКП «Современные строительные материалы и технологии»; madina_salamanova@mail.ru

Information about authors:

Said-Alvi Yu. Murtazaev, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department of Construction Production Technology; s.murtazaev@mail.ru

Madina Sh. Salamanova, Dr. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Prof., Department of Construction Technology; Director of the Scientific and Technical Center of Collective Use "Modern Building Materials and Technologies"; madina_salamanova@mail.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/ Received 04.06.2024.

Одобрена после рецензирования / Revised 28.07.2024.

Принята в печать / Accepted for publication 10.11.2024.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 624.04

DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-4-209-216



Оригинальная статья / Original article

Математическое моделирование процесса нелинейного деформирования тонкостенных конструкций

Г.М. Муртазалиев, М.М. Пайзулаев

Дагестанский государственный технический университет,
367015, г. Махачкала, пр. И. Шамиля, 70, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является разработка единого метода решения общей нелинейной краевой задачи, связанной с разрывными явлениями, позволяющего выявить все характерные особенности поведения тонкостенных систем под нагрузкой. Рассматриваются вопросы нелинейного деформирования, потери устойчивости исходной равновесной формы и послекритического поведения на примере тонкой сферической оболочки, являющейся удачной моделью, на которой проявляются и изучаются все характерные особенности работы под нагрузкой тонкостенных систем, теряющих устойчивость. **Метод.** Задача решается численно-аналитическими методами, представляющими совокупность методов теории катастроф и метода конечных разностей повышенной точности. Основное внимание уделено математическим аспектам рассматриваемых явлений и методам их исследования. **Результат.** Определены параметры напряженно-деформированного состояния докритического, критического и послекритического деформирования на примере сферической оболочки. Получены соотношения между предельными и бифуркационными значениями параметров нагрузок, позволяющие определить группу предельного состояния достигнутого уровня напряженно-деформированного состояния конструкции. **Вывод.** Решение задачи позволяет получить полную и необходимую информацию для определения степени опасности состояний конструкций и обеспечения их надежности.

Ключевые слова: нелинейные задачи, особые точки, разрывные явления, теория катастроф, потеря устойчивости, послекритическое поведение

Для цитирования: Г.М. Муртазалиев, М.М. Пайзулаев. Математическое моделирование процесса нелинейного деформирования тонкостенных конструкций. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2024;51(4):209-216. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-4-209-216

Mathematical modeling of the process of nonlinear deformation of thin-walled structures

G.M. Murtazaliev, M.M. Paizulaev

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

Abstract. Objective. The objective is to develop a unified method for solving a general nonlinear boundary value problem associated with discontinuous phenomena, which allows identifying all the characteristic features of the behavior of thin-walled systems under load. The issues of nonlinear deformation, loss of stability of the initial equilibrium shape and post-critical behavior are considered using the example of a thin spherical shell. **Method.** The problem is solved by numerical and analytical methods, representing a set of methods of catastrophe theory and the finite difference method of increased accuracy. The main attention is paid to the mathematical aspects of the phenomena under consideration. **Result.** The parameters of the stress-strain state of subcritical, critical and postcritical deformation are determined using a spherical shell as an example. The relationships between the limit and bifurcation values of the load

parameters are obtained, allowing us to determine the group of the limit state of the achieved level of the stress-strain state of the structure. **Conclusion.** The solution of the general problem allows us to obtain complete and necessary information to determine the degree of danger of the states of structures and ensure their reliability.

Keywords: nonlinear problems, singular points, discontinuous phenomena, catastrophe theory, loss of stability, post-critical behavior

For citation: G.M. Murtazaliev, M.M. Paizulaev. Mathematical modeling of the process of nonlinear deformation of thin-walled structures. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2024;51(4):209-216. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-4-209-216

Введение. Несмотря на огромное число публикаций теоретического и экспериментального характера изучение процесса нелинейного деформирования тонкостенных систем остаётся сложной, актуальной и до конца ещё нерешённой как в теоретическом, так и практическом плане проблемой теории сооружений. Это видно и из последних изданий нормативных документов [1,2], в которых потеря устойчивости в [1] была отнесена к I, так и II группе предельных состояний, а в [2] она отнесена только к I группе. На наш взгляд, это является «шагом назад» в деле понимания сути происходящих явлений и выявления скрытых резервов надёжности, поскольку известны случаи, когда предельная нагрузка (несущая способность) конструкции выше бифуркационной на 25-30%.

Причиной огромного внимания остаётся и сохраняющееся расхождение между теоретическими и экспериментальными данными значений нагрузок для реальных конструкций [11-21]. Сложность изучения проблемы заключается в необходимости анализа разрывных явлений, происходящих при конкретных значениях внешних (управляющих) и внутренних (поведенческих) параметров, входящих в систему исходных нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных высокого порядка, описывающих поведение этих систем под нагрузкой. Эти явления хуже поддаются анализу и решению не только аналитическими, но и численными методами, что требует поиска новых и совершенствование существующих методов решения задач.

Постановка задачи. Для решения такой общей задачи выяснения всех особенностей и получения полной и необходимой информации поведения конструкций, в настоящее время, в их расчётах учитываются нелинейности, которые усложняют чисто математические и вычислительные аспекты доведения расчетов до конкретных численных значений. Точных аналитических методов решения получающихся при этом нелинейных краевых задач, связанных исчерпанием прочности, жесткости или устойчивости, пока не существуют. Математические основы задач изучаются в теории ветвления решений нелинейных уравнений, которая в свою очередь состоит из трёх частей (рис.1) [3,4,5].

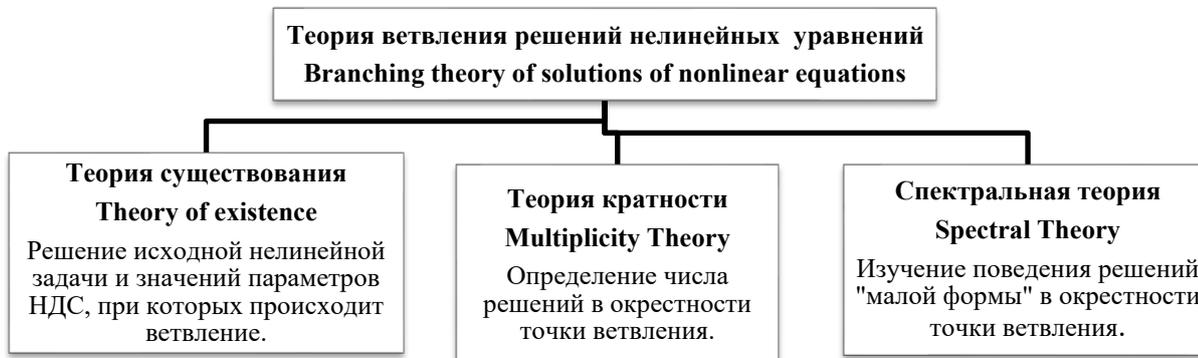


Рис. 1. Теории ветвления решений нелинейных уравнений
Fig. 1. Branching theories of solutions of nonlinear equations

В соответствии с этим в данной работе, изучение поведения тонкостенных систем под внешней нагрузкой, разделено на три взаимосвязанных и последовательных этапа, каждый из которых может рассматриваться и как отдельная задача (рис. 2).

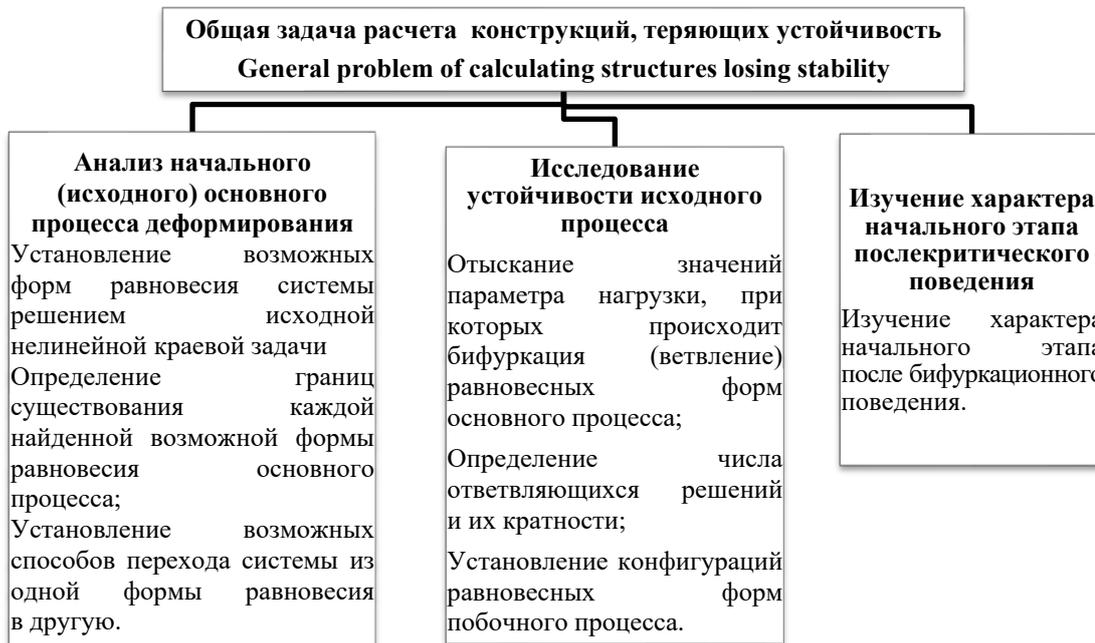


Рис. 2. Общая задача расчета конструкций, теряющих устойчивость
Fig. 2. General problem of calculating structures that are losing stability



Рис. 3. Возможные постановки бифуркационных задач
Fig. 3. Possible formulations of bifurcation problems

Решается четвёртый тип задачи исследования проблем устойчивости (по принятой в работе [1] классификации): нелинейный исходный процесс и нелинейная задача изучения потери устойчивости и послекритического поведения конструкций, который и позволяет выяснить все особенности их деформирования (рис.3). В качестве исходных примем известную систему из двух нелинейных дифференциальных уравнений смешанного вида, относительно функции прогибов W и функции усилий F , описывающие геометрически нелинейную задачу поведения под нагрузкой пологого купола:

$$\begin{cases} D \cdot \nabla^4 \tilde{W} = \nabla_{\kappa}^2 \tilde{F} + L(W, F) + \tilde{q}; \\ (1/Eh) \cdot \nabla^4 F = -\nabla_{\kappa}^2 W - (1/2) \cdot L(W, W), \end{cases} \quad (1)$$

где $\nabla_{\kappa}^2(\cdot)$, $L(\cdot)$ – нелинейные дифференциальные операторы, имеющие в полярных координатах вид:

$$\begin{aligned} \nabla_{\kappa}^2(\cdot) &= K_2 \frac{\partial^2(\cdot)}{\partial r^2} + K_1 \left[\frac{1}{r} \frac{\partial(\cdot)}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2(\cdot)}{\partial \varphi^2} \right]; \\ L(W, F) &= \frac{\partial^2 W}{\partial r^2} \cdot \left(\frac{\partial F}{r \partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 F}{\partial \varphi^2} \right) + \frac{\partial^2 F}{\partial r^2} \cdot \left(\frac{\partial W}{r \partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 W}{\partial \varphi^2} \right) + 2 \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\partial W}{r \partial \varphi} \right) \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\partial F}{r \partial \varphi} \right) \end{aligned}$$

Заменой F на W находится оператор $L(W, W)$. Вместе с соответствующими граничными условиями они составляют полную систему исходных уравнений решаемой задачи.

Особенностью этой системы является наличие особых в их решениях точек, в которых функциональный определитель данной системы вырождается. Механически эти точки соответствуют предельной точке или точке ветвления решений системы (1). В случае осесимметричной задачи система (1) может быть проинтегрирована и её первый интеграл принимает вид:

$$\begin{cases} D \frac{d}{dr} (\nabla^2 W) = h \frac{dF}{dr} \left(\frac{1}{r} \frac{dW}{dr} + K \right) + \Psi(r); \\ \frac{d}{dr} (\nabla^2 \Phi) = -E \left[\frac{1}{2r} \left(\frac{dW}{dr} \right)^2 + K \frac{dW}{dr} \right], \end{cases} \quad (2)$$

где $\nabla^2(\cdot) = \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left[r \frac{d(\cdot)}{dr} \right]$ – оператор Лапласа в полярных координатах для осесимметричной задачи. В общепринятых безразмерных параметрах и обозначениях уравнения осесимметричного деформирования (4) имеют вид:

$$\begin{cases} (r \cdot \Theta)' - \frac{\Theta}{r} = \Phi(\Theta - r) - \Psi_0(r); \\ (r \cdot \Phi)' - \frac{\Phi}{r} = -\Theta \left(\frac{\Theta}{2} - r \right), \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{где } \Psi_0(r) = 4 \int q r dr. \quad (4)$$

В случае загрузки оболочки давлением интенсивности q , приложенным к круговой области радиуса r_1 с центром в вершине купола (рис. 4):

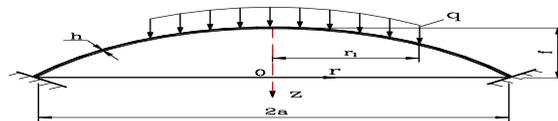


Рис. 4. Загрузка оболочки давлением интенсивности
 Fig. 4. Loading the shell with pressure intensity

$$\Psi_0(r) = \begin{cases} 2qr^2, & r < b_1; \\ 2qb^2, & r > b_1, \end{cases} \quad (5)$$

$$\text{где } b_1 = \frac{r_1}{a} b.$$

В этом случае уравнения могут быть записаны в единообразной форме:

$$\begin{cases} (r \cdot \Theta)' - \frac{\Theta}{2} = \Phi(\Theta - r) - 2q \cdot b_1^2 \cdot \delta(r); \\ (r \cdot \Phi)' - \frac{\Phi}{r} = -\Theta \left(r + \frac{\Theta}{2} \right), \end{cases} \quad (6)$$

$$\text{где } \delta(r) = \begin{cases} r^2, & r < b_1; \\ b_1^2, & r > b_1. \end{cases} \quad (7)$$

Методы исследования. Для решения этой нелинейной системы уравнений разработаны различные методы, в которых используются разные «ухищрения» отыскания и «обхода» особых точек. В работах авторов [5,6,7] использованы: вариант метода дифференцирования по параметру, являющийся математической основой «шаговых» методов решения нелинейных задач, в котором в окрестности особой точки производится смена ведущего параметра и тем самым позволяющий пройти всю кривую равновесных состояний, являющейся информативно емкой характеристикой при решении таких задач. В зависимости от выбранного параметра дифференцирования метод становится методом последовательных догрузок или последовательных деформаций. Получаемые уравнения интегрируются одним из известных методов [3,8,9]. Другими методами, ставшими в последние годы эффективным средством решения задач, связанных с разрывными явлениями и использованными авторами статьи, являются методы (алгебраические средства и геометрические образы) теории катастроф, позволяющие едиными и наглядными образами охватить работу целого класса конструкций [3,8,9].

Для решения задач составлены блок-схемы и программы на языке C++ на основе которых решены конкретные задачи расчета этих систем. Исследование потери устойчивости исходных равновесных форм. Полученная единая трёхмерная картина даёт представление о равновесных состояниях целого класса оболочек-зависимости между поведенческим (внутренним) параметром-прогибом W в вершине купола и двумя управляющими (внешними) параметрами: K - геометрическим параметром, характеризующим кривизну оболочки и q - параметром внешней нагрузки. Из этой картины, являющейся «вездесущей катастрофой сборки» [5] видно, что внутри сборки (между кривыми 1 и 2 на рис. 5) у оболочек возможны 3 состояния равновесия- два устойчивых, соответствующих значениям верхней и нижней критических значений нагрузки и одно неустойчивое состояние.

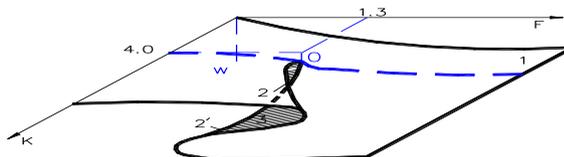


Рис. 5. Катастрофа сборки – поверхность равновесных состояний оболочек при различных параметрах

Fig. 5. Assembly catastrophe – surface of equilibrium states of shells under different parameters

На кривых 1 и 2 существуют по два совпадающих и одно отдельное значение, вне заштрихованной области - по одному решению задачи. Картина качественно и количественно соответствует реальному поведению систем, но не выявляет качества самых найденных состояний равновесия и возможной потери устойчивости путём ветвления (бифуркации) исходных равновесных форм по смежным несимметричным формам равновесий. Для изучения этого явления представим решение исходной системы уравнений (1) в момент потери устойчивости в форме:

$$\begin{aligned} W(r, \varphi) &= W_0(r) + \xi W_1(r, \varphi); \\ F(r, \varphi) &= F_0(r) + \xi F_1(r, \varphi), \end{aligned} \quad (8)$$

где: $W_0(r)$ и $F_0(r)$ – параметры, характеризующие осесимметричное поведения оболочки; $W_1(r, \varphi)$ и $F_1(r, \varphi)$ - параметры, новой смежной несимметричной формы равновесия; ξ – бесконечно малый параметр.

Подставляя (8) в (1) с учетом (6) получим следующую систему линейных однородных уравнений относительно W и F :

$$\begin{aligned} \nabla^4 W_1 &= \nabla^2 F_1 - \left(\frac{\dot{F}_1}{r} - \frac{\ddot{F}_1}{r^2} \right) \Theta' + \frac{\Phi}{r} W_1'' - \frac{F_1''}{r} \Theta + \left(\frac{W_1}{r} + \frac{\dot{W}_1}{r^2} \right) \Phi; \\ \nabla^4 F_1 &= -\nabla^2 W_1 + \left(\frac{W_1}{r} + \frac{\dot{W}_1}{r^2} \right) \Theta' + \frac{W_1''}{r} \Theta. \end{aligned} \quad (9)$$

Равенство нулю определителя системы (9) при определенных значениях Q и Φ , определяет параметр критической нагрузки бифуркации. Для решения этого этапа задачи составлена блок-схема и программа на языке C++, на основе которой получены конкретные численные значения, хорошо согласующиеся с известными в литературе данными.

Обсуждение результатов. Исследование начального этапа послекритического состояния. Определение значения критической нагрузки, при котором происходит потеря устойчивости исходной осесимметричной формы не определяет характера равновесного состояния конструкции в самой точке ветвления (бифуркации) равновесных форм. Дело в том, что от «природы» этой точки зависит характер начального этапа послекритического поведения конструкции: если эта точка относится к устойчивой (восходящей) возникшей вторичной ветви, то в самой точке ветвления конструкция ещё не исчерпала своей несущей способности; если же точка ветвления относится к неустойчивой (нисходящей) вторичной ветви, эта точка является предельной, в которой конструкция теряет несущую способность и её дальнейшее поведение приобретает характер «перескока» в другие (отдалённые) равновесные состояния [5]. Таким образом, «природа» точки ветвления определяет степень опасности достижения данной точки и гарантия против достижения соответствующего значения нагрузки должна быть различной. Это достигается отнесением достигнутого состояния и соответствующего значения нагрузки к тому или иному предельному состоянию, что является предметом различных толкований в нормативных документах последних изданий [1,2]. Для решения этого этапа задачи, представим решение уравнений (1) в следующем виде:

$$\begin{aligned} W &= W_0 + \xi W_1 + \xi^2 W_2 + \dots; \\ F &= F_0 + \xi F_1 + \xi^2 F_2 + \dots, \end{aligned} \quad (10)$$

где W_0 и F_0 – параметры исходного осесимметричного деформирования; W_1 и F_1 – нормированные значения собственных функций, характеризующие форму выпучивания; W_2 и F_2 – функции, характеризующие начальный этап послекритического поведения оболочки, подлежащие определению; ξ – малый параметр.

Подставляя выражения (10) в исходные уравнения (9), приравнивая коэффициенты при одинаковых степенях параметра ξ в правых и левых частях, с учетом уравнений (6) получим следующие уравнения:

$$\begin{aligned} \nabla^4 W_2 - \nabla^2 F_2 + \left(\frac{F_2'}{r} + \frac{\ddot{F}_2}{r^2} \right) \cdot \Theta_{cr}' + \frac{W_2''}{r} \Phi_{cr} + \frac{F_2''}{r} \Theta_{cr} - \left(\frac{W_2'}{r} + \frac{\ddot{W}_2}{r^2} \right) \cdot \Phi_{cr}' &= \left(\frac{F_1'}{r} + \frac{\ddot{F}_1}{r^2} \right) \cdot \dot{W}_1 + \left(\frac{W_1'}{r} + \frac{\dot{W}_1}{r^2} \right) \cdot F_1'' - 2 \left(\frac{\dot{F}_1}{r} \right)' \left(\frac{\dot{W}_1}{r} \right)'; \\ \nabla^4 F_2 + \nabla^2 W_2 - \left(\frac{W_2'}{r} + \frac{\dot{W}_2}{r^2} \right) \cdot \Theta_{cr}' - \frac{W_2''}{r} \cdot \Theta_{cr} &= \left(\frac{W_1'}{r} - \frac{\dot{W}_1}{r^2} \right)^2 - \left(\frac{W_1'}{r} + \frac{\dot{W}_1}{r^2} \right) \cdot W_1''. \end{aligned} \quad (11)$$

Решение осуществляется на основе модификации теории послекритического поведения, предложенных в работах Койтера [10]. Составлена блок-схема и программа для решения задачи и получены конкретные значения параметров, позволяющих однозначно ответить на поставленные вопросы.

Вывод. Несмотря на огромное число публикаций, проблема исследования особенностей поведения конструкций и выявления их скрытых резервов надёжности остаётся сложной, актуальной, до конца не решённой проблемой теории сооружений. Ещё более запутаны вопросы устойчивости и определения степени опасности достижения того или иного состояния. Опасны не столько потеря устойчивости равновесной формы или состояния равновесия сами по себе, нужно выяснить степень опасности достижения этих состояний, в зависимости, от которой гарантия против их наступления должна быть различной.

В нормативных документах, которые сами претерпевают серьезные изменения, нет единой трактовки этих вопросов. Для однозначного ответа на эти вопросы нужны более полные и глубокие исследования, в которых рассматривается весь процесс деформирования конструкций на всех этапах и выявление особенностей их поведения. Все это требует учёта в расчётах различного вида нелинейностей, разработки и совершенствования достоверных и эффективных методов их расчета. В статье предлагается один из возможных путей решения этой проблемы.

Библиографический список:

1. ГОСТ 27751-88 (СТ СЭВ 384-87). Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения по расчету. Введ. с 01.07.88. -М.: Изд-во стандартов, 1988. -9 с.
2. ГОСТ 27751-2014 (Межгосударственный стандарт) Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения. Введ. с 01.07.2015. –М.: Стандартинформ, 2015. -16 с.
3. Вайнберг М.М., Треногин В.А. Теория ветвления решений нелинейных уравнений. -М.: Наука, 1969. -527 с.
4. Теория ветвлений и нелинейные краевые задачи на собственные значения /Под ред. Дж.Б. Келлера и С. Антмана. -М.: Мир, 1974. -256 с.
5. Муртазалиев Г.М. Методы теории катастроф в задачах устойчивости оболочек. ДГТУ. Махачкала 2004. -200 с.
6. Муртазалиев Г.М., Пайзулаев М.М. Предельное состояние по условию потери устойчивости равновесных форм // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2021. Т. 48. №4. С. 171-177.
7. Муртазалиев Г.М., Акаев А.И., Пайзулаев М.М. Основные соотношения начального этапа послекритического деформирования конструкций // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2013. №1 (28). С. 90-93.
8. Постон Т., Стюарт И. Теория катастроф и ее приложения. -М.: Мир, 1980. -608 с.
9. Томпсон Д.М.Т. Неустойчивости и катастрофы в науке и технике. -М.: Мир, 1985.- 256 с.
10. Койтер В.Т. Устойчивость и критическое поведение упругих систем //Механика. Периодич. сб. пер. иностр. лит. -М.: ИЛ, 1960. -N5. -С. 99-110.
11. Григолюк Э.И., Шалашин В.И. Проблемы нелинейного деформирования: Метод продолжения решения по параметру в нелинейных задачах механики твердого деформируемого тела. -М.: Наука, 1988. -232 с.
12. Алфутов Н.А. Основы расчета на устойчивость упругих систем. М.: Машиностроение, 1978. -312 с.
13. Пановко Я.Г., Губанова И.И. Устойчивость и колебания упругих систем: Современные концепции, ошибки и парадоксы. -3-е изд., перераб.-М.: Наука, 1979. -384 с.
14. Броуде Б.М., Бельский Г.И., Беляев Б.И. О потере устойчивости как предельном состоянии стальных конструкций //Строительная механика и расчет сооружений. -1990. -N3. -С.88-91.
15. Гилмор Р. Прикладная теория катастроф. В 2 кн. -М.: Мир, 1984. Кн.1. -350 с.
16. Агаханов Э.К. Применение эквивалентностей в моделировании задач механики // В сборнике: Строительство и архитектура: теория и практика сейсмической безопасности. Сборник научных статей по итогам деятельности международной научно-практической конференции, посвящённой памяти д.т.н., профессора А.Д. Абакарова. Махачкала, 2023. С. 63-69.
17. Клочкин Ю.В., Пшеничкина В.А., Николаев А.П., Марченко С.С., Вахнина О.В., Клочкин М.Ю. Расчет оболочек вращения при использовании смешанного МКЭ с векторной аппроксимационной процедурой // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2024. №1. С. 13-27.
18. Коротков М.М., Минаева Н.В., Гриднев С.Ю., Скалько Ю.И. Предельное состояние упругой полосы при комбинированном нагружении //Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики. Сборник трудов Международной научной конференции. Воронеж, 2024. С. 1099-1102.
19. Коровайцева Е.А. К обоснованию однозначности продолжения решения задач о деформировании мягких оболочек методом дифференцирования по параметру // Проблемы прочности и пластичности. 2022. Т. 84. № 3. С. 343-350.
20. Железнов Л.П., Серьезнов А.Н. Исследование нелинейного деформирования и устойчивости композитной оболочки при чистом изгибе и внутреннем давлении // Прикладная механика и техническая физика. 2022. Т. 63. № 2 (372). С. 207-216.
21. Нугужинов Ж.С., Боженов А.Ш., Курохтин А.Ю., Жакибеков М.Е., Пчельникова Ю.Н. К вопросу о теории устойчивости многослойных ортотропных пологих тонкостенных строительных конструкций типа оболочек и пластин с неоднородными по толщине слоями // Промышленное и гражданское строительство. 2016. №1. С. 62-67.

References:

1. GOST 27751-88 (ST SEV 384-87). Reliability of building structures and foundations. Basic provisions for calculation. Introduced on 01.07.88. -M.: Publishing house of standards, 1988;9.

2. GOST 27751-2014 (Interstate standard) Reliability of building structures and foundations. Basic provisions. Introduced on 01.07.2015. -M.: Standartinform, 2015;16.
3. Weinberg M.M., Trenogin V.A. Branching theory of solutions of nonlinear equations. M.: Science, 1969;527.
4. Branching theory and nonlinear boundary value problems with eigenvalues. Ed. by J.B. Keller and S. Antman. M.: Mir, 1974;256.
5. Murtazaliev G.M. Methods of catastrophe theory in problems of shell stability. DSTU. Makhachkala 2004; 200.
6. Murtazaliev G.M., Paizulaev M.M. Limit state under the condition of loss of stability of equilibrium forms *Herald of the Dagestan State Technical University. Technical Sciences.* 2021; 48.(4):171-177.
7. Murtazaliev G.M., Akaev A.I., Paizulaev M.M. Basic relationships of the initial stage of post-critical deformation of structures. *Herald of the Dagestan State Technical University. Technical Sciences.* 2013; 1 (28): 90-93.
8. Poston T., Stewart I. Catastrophe Theory and Its Applications. Moscow: Mir. 1980; 608.
9. Thompson D.M.T. Instabilities and Catastrophes in Science and Technology. Moscow: Mir, 1985; 256.
10. Koiter V.T. Stability and Postcritical Behavior of Elastic Systems. *Mechanics. Periodical Collection of Foreign Literature.* Moscow: IL, 1960;5: 99-110.
11. Grigolyuk E. I., Shalashilin V. I. Problems of Nonlinear Deformation: Method of Continuation of Solution with Respect to Parameter in Nonlinear Problems of Mechanics of a Solid Deformable Body. Moscow: Nauka, 1988; 232.
12. Alfutov N.A. Fundamentals of Stability Calculation of Elastic Systems. Moscow: Mashinostroenie, 1978;312.
13. Panovko Ya.G., Gubanov I.I. Stability and Oscillations of Elastic Systems: Modern Concepts, Errors, and Paradoxes. - 3rd ed., revised. - Moscow: Nauka, 1979;384 .
14. Broude B.M., Belsky G.I., Belyaev B.I. On Loss of Stability as a Limit State of Steel Structures. *Structural Mechanics and Analysis of Structures.* 1990;3:88-91.
15. Gilmore R. Applied Theory of Catastrophes. In 2 books. Moscow: Mir, 1984;1:350.
16. Agakhanov E.K. Application of equivalences in modeling mechanical problems // In the collection: Construction and architecture: theory and practice of seismic safety. Collection of scientific articles on the results of the international scientific and practical conference dedicated to the memory of Doctor of Technical Sciences, Professor A.D. Abakarov. Makhachkala, 2023; 63-69.
17. Klochkov Yu.V., Pshenichkina V.A., Nikolaev A.P., Marchenko S.S., Vakhnina O.V., Klochkov M.Yu. Calculation of shells of revolution using a mixed FEM with a vector approximation procedure. *Problems of mechanical engineering and reliability of machines.* 2024;1:13-27.
18. Korotkov M.M., Minaeva N.V., Gridnev S.Yu., Skalko Yu.I. Limit state of an elastic strip under combined loading. Actual problems of applied mathematics, computer science and mechanics. Collection of works of the International scientific conference. Voronezh, 2024; 1099-1102.
19. Korovaitseva E.A. On the justification of the uniqueness of the continuation of the solution of problems on the deformation of soft shells by the method of differentiation with respect to the parameter. *Problems of strength and plasticity.* 2022; 84(3): 343-350.
20. Zheleznov L.P., Sereznov A.N. Study of nonlinear deformation and stability of a composite shell under pure bending and internal pressure. *Applied mechanics and technical physics.* 2022; 63(2 (372)): 207-216.
21. Nuguzhinov Zh.S., Bozhenov A.Sh., Kurokhtin A.Yu., Zhakibekov M.E., Pchelnikova Yu.N. On the issue of the theory of stability of multilayer orthotropic shallow thin-walled building structures such as shells and plates with layers of non-uniform thickness. *Industrial and civil engineering.* 2016;1:62-67.

Сведения об авторах:

Муртазалиев Гелани Муртазалиевич, доктор технических наук, профессор, кафедра сопротивления материалов, теоретической и строительной механики; ventav@mail.ru

Пайзулаев Магомед Муртазалиевич, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой сопротивления материалов, теоретической и строительной механики; ventav@mail.ru

Information about the authors:

Gelani M. Murtazaliev, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department Resistance of Materials, Theoretical and Construction Mechanics; ventav@mail.ru

Magomed M. Payzulaev, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Head of the Department Resistance of Materials, Theoretical and Construction Mechanics; ventav@mail.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/ Received 26.09.2024.

Одобрена после рецензирования / Revised 24.10.2024.

Принята в печать/ Accepted for publication 06.11.2024.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 691.53

DOI: 10.21822/2073-6185-2024-51-4-217-225



Оригинальная статья /Original article

Влияние редуспергируемых полимерных порошков на некоторые свойства строительных растворов с комплексными минеральными добавками

Г.В. Несветаев¹, Г.Н. Хаджишалапов², И.А. Животкова²

¹Донской государственной технической университет,
¹344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1, Россия,

²Дагестанский государственной технической университет,
²367015, г. Махачкала, пр. Имама Шамиля, 70, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является выявление закономерности изменения свойств, полученных из сухих строительных смесей (ССС) строительных растворов в зависимости от дозировки редуспергируемых полимерных порошков (РПП), состава комплексной минеральной добавки (КМД) и продолжительности твердения в воздушно-сухих условиях. **Метод.** Исследования проводились согласно нормативным документам: ГОСТ 31356–2013 Смеси сухие строительные на цементном вяжущем. Методы испытаний. ГОСТ Р 58277-2018 Смеси сухие строительные на цементном вяжущем. ГОСТ 31108-2016 Методы испытаний, цементы общестроительные. Технические условия. **Результат.** Наличие в составе СССР РПП приводит к повышению предела прочности при изгибе при выдерживании до 120 сут. в воздушно-сухих условиях и увеличению прочности сцепления с основанием. Наибольшая прочность сцепления наблюдается в составах с золой уноса. Введение РПП и состав МКД оказывают незначительное влияние на повышение модуля упругости. Выявлено положительное влияние РПП в повышении предела прочности при изгибе при продолжительном твердении строительного раствора в воздушно-сухих условиях. Отмечено влияние РПП на скорость твердения раствора в раннем возрасте. **Вывод.** Замена части природного минерального сырья техногенными отходами и употребление РПП позволит повысить экологическую и экономическую эффективность производства СССР и обеспечить производство строительных растворов с требуемыми свойствами.

Ключевые слова: редуспергируемые полимерные порошки, водоудерживающая добавка, строительный раствор, минеральная добавка, сухие строительные смеси

Для цитирования: Г.В. Несветаев, Г.Н. Хаджишалапов, И.А. Животкова. Влияние редуспергируемых полимерных порошков на некоторые свойства строительных растворов с комплексными минеральными добавками. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2024;51(4):217-225. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-4-217-225

Effect of redispersible polymer powders on some properties of mortars with complex mineral additives

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. To identify patterns in changes in the properties of building mortars obtained from dry building mixtures (DBM) depending on the dosage of redispersible polymer powders (RPP), the composition of the complex mineral additive (CMA) and the duration of hardening in air-dry conditions. **Method.** The studies were conducted in accordance with the regulatory documents: GOST 31356–2013 Dry building mixtures on a cement binder.

Test methods. GOST R 58277-2018 Dry building mixtures on a cement binder. GOST 31108-2016 Test methods, general construction cements. Specifications. **Result.** The presence of RPP in the composition of DBM leads to an increase in the flexural strength when kept for up to 120 days in air-dry conditions and an increase in the adhesion strength to the base. The greatest adhesion strength is observed in compositions with fly ash. The introduction of RPP and the composition of the MKD have an insignificant effect on increasing the modulus of elasticity. A positive effect of RPP in increasing the flexural strength limit during prolonged hardening of the mortar in air-dry conditions was revealed. The effect of RPP on the rate of hardening of the mortar at an early age was noted. **Conclusion.** Replacing part of the natural mineral raw materials with technogenic waste and using RPP will increase the environmental and economic efficiency of the production of SSS and ensure the production of mortars with the required properties.

Keywords: redispersible polymer powder, water-retaining agent, building mortar, mineral additive, dry building mixtures

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. 2024;51(4):217-225. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-4-217-225

Введение. Рост производства и потребления сухих строительных смесей (ССС), превышающий в некоторых странах 30 кг/чел. в год [1], обусловлен тем, что применение СССР при возведении зданий и сооружений, производстве ремонтно-восстановительных работ помимо повышения качества отделочных работ обеспечивает значительное снижение материалоемкости и трудозатрат, существенно упрощает логистику и складирование на объектах, позволяет практически исключить влияние погодных условий и зависимость ритма производства работ от времени транспортирования [1,2]. Общестроительные и специальные СССР на цементной основе составляют до 70% объема производимых в стране СССР [3-5].

Поскольку на минеральное сырье при производстве некоторых строительных материалов приходится до 50% себестоимости, то очевидно, что в случае замены части природного минерального сырья техногенными отходами и особенно при замене части цемента природными либо техногенными может иметь место экономический и, что особенно важно, экологический эффект [6-8]. Одной из ведущих тенденций в производстве СССР для строительных растворов различного назначения является применение активных и инертных минеральных добавок (МД), как правило, в виде наполнителей [9], поскольку их применение способствует получению более плотной структуры [10]. Отмечается, что указанные добавки являются обязательным компонентом СССР [11].

Важным компонентом большинства СССР являются редиспергируемые полимерные порошки (РПП), влияющие на прочность сцепления с основанием и деформационные свойства полученных из СССР строительных растворов. По данным [12] при введении РПП в состав клея повышение адгезии составило 0,2-0,25 МПа. Согласно [13] возможно повышение адгезии до 2,5 раза. Прочность сцепления с основанием зависит от вида основания. Согласно [14] адгезия к силикатному кирпичу составила от 0,29 до 0,57 МПа, т.е. примерно 75% от величины адгезии к бетону от 0,39 до 0,76 МПа. По данным [15] адгезия к силикатному кирпичу составила от 0,28 до 0,48 МПа, к керамическому кирпичу – от 0,34 до 0,62 МПа, т.е. 56-64% и 68-82% от величины прочности сцепления с бетонным основанием от 0,5 до 0,75 МПа. По данным [16] прочность сцепления с силикатным кирпичом составила от 0,24 до 0,92 МПа т.е. примерно 30...50% от величины прочности сцепления со стандартным бетонным основанием от 0,8 до 1,8 МПа, а прочность сцепления с газобетоном от 0,46 до 0,67 МПа, т.е. примерно 50%, от величины прочности сцепления со стандартным бетонным основанием от 0,9 до 1,3 МПа, что согласуется с выводами [17]. Очевидно, что на первом этапе целесообразно производить оценку прочности

сцепления с неким эталоном, в качестве которого ГОСТ указывает стандартное бетонное основание. В [18] показана эффективность применения некоторых природных материалов и техногенных отходов для производства мелкозернистых бетонов с пределом прочности при сжатии до 65 МПа.

Постановка задачи. Целью настоящего исследования является выявление закономерностей изменения свойств полученных из ССС строительных растворов на основе приведенных в [18] материалов в зависимости от дозировки РПП, состава КМД и продолжительности твердения.

Методы исследования. Экспериментальные исследования выполнены с использованием [18]:

- портландцемента ЦЕМ I 42,5 Н по ГОСТ 31108-2016 активностью 51,9 МПа производства ОАО «Новоросцемент», завод «Первомайский»;
- кварцевого песка (П) с модулем крупности 1,23, удовлетворяющего требованиям к заполнителям для ССС;
- комплексной минеральной добавки (КМД), представляющей сочетание шлама химводоочистки ТЭЦ-2 города Ростова-на-Дону и МД (зола уноса (З) ПАО ОГК-2 Новочеркасской ГРЭС либо опока (О), эффективность применения которой в при производстве МЗБ отмечена, например, в [18], при соотношении Ш/МД = 1:1.

В качестве водоудерживающей добавки (ВУД) применялась «Mecellose 23701» при дозировке 0,3% от массы минеральной части смеси. Использован редуцируемый полимерный порошок (РПП) Vinavil E06РА при дозировке 1, 2 и 3% от массы минеральной части смеси. Минеральная часть смеси Ц:П:КМД = 1:1,3:0,2. Во всех составах величина В/Ц = 0,4. Выдерживание образцов осуществлялось первые сутки в форме под пленкой, далее до 7 сут в нормальных условиях (НУ), далее до 120 сут в воздушно-сухих условиях при температуре 22 – 25°C и относительной влажности 45 – 55%.

Обсуждение результатов. Определяли следующие показатели затвердевших строительных растворов:

- предел прочности при сжатии и растяжении при изгибе по ГОСТ Р 58277-2018 в возрасте 2, 28 и 120 сут (образцы 40x40x160 мм);
- начальный модуль упругости E по ф. (1) через динамический модуль упругости E_d [19]:

$$E = kE_d = kk_1\rho V^2 \quad (1)$$
- где, ρ – средняя плотность раствора (мелкозернистого бетона); V – скорость ультразвука, $kk_1 = 0,62$;
- прочность сцепления со стандартным бетонным основанием по ГОСТ 31356-2007 в возрасте 28 и 120 сут.

На рис. 1 представлена зависимость предела прочности при сжатии исследованных строительных растворов от дозировки РПП в возрасте 2, 28 и 120 сут. 2, 28, 120 – возраст раствора; о, з – соответственно опока или зола-уноса в составе КМД

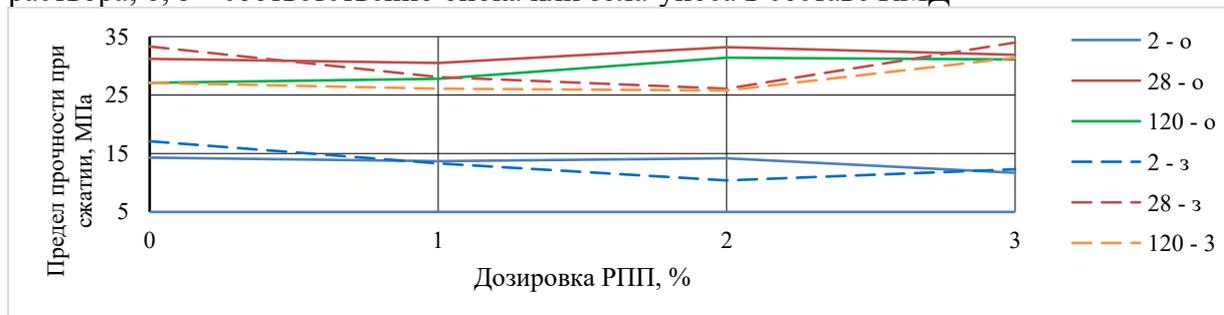


Рис. 1. Зависимость предела прочности при сжатии исследованных строительных растворов от дозировки РПП

Fig. 1. Dependence of the compressive strength of the studied building mortar on the dosage of RPP

Из представленных на рис.1 результатов следует, что:

- влияние дозировки РПП на предел прочности зависит от вида КМД, в меньшей степени влияет опока;
- длительное выдерживание (до 120 сут) в воздушно-сухих условиях может вызывать даже некоторое снижение предела прочности при сжатии, но этот эффект не связан с РПП;
- соотношение R_2/R_{28} исследованных растворов при дозировке РПП до 2% составляет от 0,51 до 0,4 и снижается с ростом содержания РПП, а при дозировке РПП 3% составляет 0,36, что свидетельствует о замедляющем твердение эффекте в раннем возрасте при введении РПП.

Следует отметить, что в результате введения в состав строительного раствора ВУД и РПП произошло существенное снижение средней плотности, т.е. увеличение общей пористости до 20% в сравнении с составами без указанных добавок [18] за счет дополнительного воздухововлечения, что привело к снижению предела прочности при сжатии до 25,8 – 33,3 МПа, который у бездобавочного эталона составлял в 120 сут 56,3 МПа [18].

На рис. 2 представлена зависимость предела прочности при изгибе R_f исследованных строительных растворов от предела прочности при сжатии R .

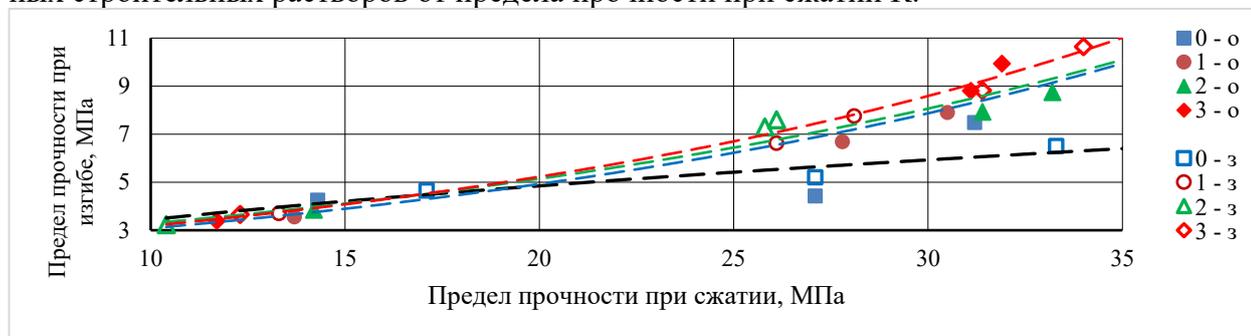


Рис. 2. Зависимость предела прочности при изгибе от предела прочности при сжатии
Fig. 2. Dependence of the flexural strength on the compressive strength

0 – 3 – содержание РПП, %; о, з – соответственно опока или зола в составе КМД; черный пунктир – О + 3 без ВУД и РПП; синий, зеленый, красный пунктир – соответственно О + 3, ВУД, содержание РПП 1, 2, 3%

Из представленных на рис. 2 результатов очевидно:

- в области прочности при сжатии до 20 МПа (это результаты испытаний в возрасте 2 сут) на зависимость $R_f = f(R)$ практически не влияют такие факторы, как состав КМД и содержание РПП;
- с ростом возраста строительного раствора при выдерживании в воздушно-сухих условиях прослеживается тенденция не только количественного, но и качественного изменения зависимости $R_f = f(R)$ при наличии в составе РПП, что позволяет сделать вывод о положительной роли РПП в повышении предела прочности при изгибе при выдерживании до 120 сут в воздушно-сухих условиях.

Зависимость предела прочности при изгибе R_f от предела прочности при сжатии R описывается уравнением:

$$\frac{R_f}{R} = a \cdot \exp(bR), \quad (1)$$

коэффициенты a, b и показатель достоверности аппроксимации R^2 которого представлены в табл.1.

На рис. 3 представлена зависимость начального модуля упругости исследованных строительных растворов от предела прочности при сжатии. 0 – 3 – содержание РПП, %; о, з – соответственно опока или зола в составе КМД; черный пунктир – О + 3 без ВУД и РПП; синий, зеленый, красный пунктир – соответственно О + 3, ВУД, содержание РПП 1, 2, 3%

Таблица 1. Параметры уравнения ф. (1)
 Table 1. Parameters of the equation f. (1)

№	Состав / Compound	Параметры уравнения ф. (1) Parameters		
		a	b	R^2
1	O – 0	2,76	0,026	0,565
2	O – 1	1,87	0,047	0,996
3	O – 2	2,1	0,043	0,999
4	O – 3	1,85	0,051	0,989
5	3 – 0	3,24	0,02	0,9
6	3 – 1	1,94	0,048	0,989
7	3 – 2	1,85	0,054	0,997
8	3 – 3	2,02	0,048	0,993
9	O+3 – 0	1,1	0,495	0,552
10	O+3 – 1	1,93	0,047	0,972
11	O+3 – 2	2,1	0,045	0,936
12	O+3 – 3	1,94	0,05	0,99

Из представленных на рис. 3 результатов следует:

- в области прочности при сжатии до 20 МПа (это результаты испытаний в возрасте 2 сут) на зависимость $E = f(R)$ практически не влияют такие факторы, как состав КМД и содержание РПП;
- с ростом возраста строительного раствора при выдерживании в воздушно-сухих условиях прослеживается тенденция, во-первых, количественного изменения зависимости $E = f(R)$ при наличии в составе РПП, при этом содержание РПП также оказывает некоторое влияние на численные значения, во-вторых, отмечается сближение значений модуля упругости составов, не содержащих и содержащих РПП в дозировке 2 – 3%, что позволяет сделать вывод о влиянии РПП в формировании деформационных свойств растворов при выдерживании до 120 сут в воздушно-сухих условиях.

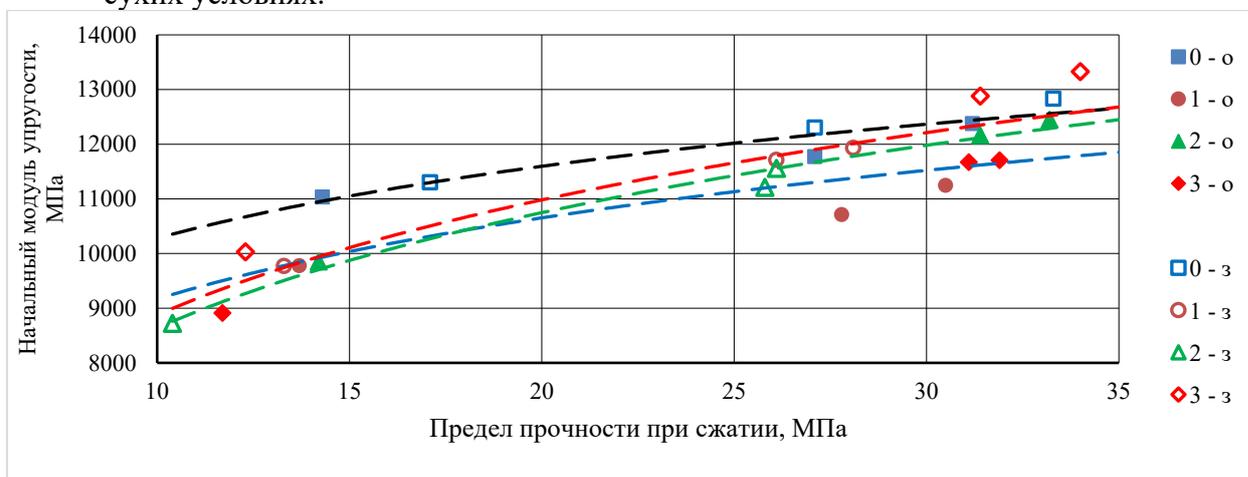


Рис. 3. Зависимость начального модуля упругости строительных растворов от предела прочности при сжатии

Fig. 3. Dependence of the initial modulus of elasticity of building mortars on the compressive strength limit

Следует отметить, что повышение модуля упругости в данном случае является негативным результатом, поскольку повышает уровень растягивающих напряжений при проявлении деформаций, например, температурных и влажностных.

Зависимость начального модуля упругости E от предела прочности при сжатии R описывается уравнением:

$$E = a \cdot \ln(R) + b, (2)$$

коэффициенты a , b и показатель достоверности аппроксимации R^2 которого представлены в табл.2.

Таблица 2. Параметры уравнения ф.(2)
 Table 2. Parameters of the equation f. (2)

№	Состав / Compound	Параметры уравнения ф. (1) Parameters		
		a	b	R^2
1	О – 0	1560	6868	0,915
2	О – 1	1642	5455	0,933
3	О – 2	2999	1889	0,998
4	О – 3	2804	2014	0,999
5	З – 0	2275	4830	0,998
6	З – 1	2884	2307	1,0
7	З – 2	2915	1891	0,989
8	З – 3	3157	2099	0,997
9	О+З – 0	1897	5912	0,891
10	О+З – 1	2143	4234	0,759
11	О+З – 2	3040	1641	0,986
12	О+З – 3	3055	1858	0,845

На рис. 4 представлена зависимость прочности сцепления со стандартным бетонным основанием исследованных строительных растворов от дозировки РПП, вида МД (о или з) в составе КМД и возраста испытаний (28 и 120 сут). 0 – 3 – дозировка РПП, %; О или З – вид МД в составе КМД; 28, 120 – возраст испытаний, сут.



Рис. 4. Зависимость прочности сцепления со стандартным бетонным основанием строительных растворов

Fig. 4. Dependence of adhesion strength of building mortars on standard concrete base

Из представленных на рис. 4 результатов следует:

- с повышением дозировки РПП, как правило, имеет место рост прочности сцепления с основанием;
- длительное (до 120 сут) выдерживание в воздушно-сухих условиях может вызывать некоторое снижение прочности сцепления, до 25% в составах с РПП и опоккой и до 13% в составах с РПП и золой, в составах без РПП снижение прочности сцепления с опоккой составило до 35%, с золой до 15%;
- составы с золой обеспечивают более высокую прочность сцепления.

На рис. 5 представлена зависимость прочности сцепления со стандартным бетонным основанием исследованных строительных растворов от предела прочности при изгибе.

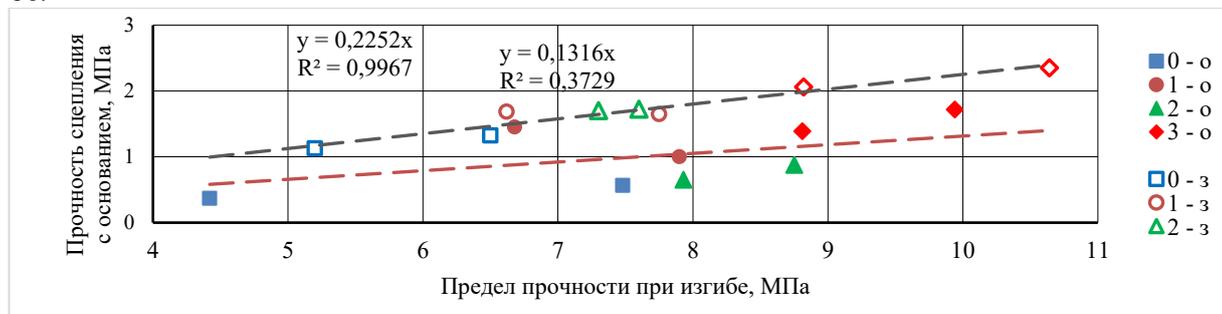


Рис. 5. Зависимость прочности сцепления со стандартным бетонным основанием строительных растворов от предела прочности при изгибе

Fig. 5. Dependence of the adhesion strength of building mortars to a standard concrete base on the flexural strength limit

Зависимость наглядно демонстрирует роль вида МД в составе КМД (о или з) в формировании прочности сцепления со стандартным бетонным основанием. 0 – 3 – содержание РПП, %; о, з – соответственно опока или зола в составе КМД

Из представленных на рис. 5 результатов очевидно, что существует тесная зависимость между прочностью сцепления и прочностью при изгибе, величина прочности сцепления составляет в среднем 0,13 от прочности при изгибе для составов с опоккой при диапазоне 0,08 – 0,22 и 0,22 для составов с золой при диапазоне 0,2 – 0,25.

По данным [16] прочность сцепления строительных растворов без КМД при содержании РПП 1-3% со стандартным бетонным основанием после 28 сут выдерживания в НУ составила в среднем 0,188 от прочности при изгибе, после выдерживания при 70°С в течение 2 недель 0,064, а после 60 циклов нагревания до 60°С и остывания 0,079. Согласно [20], при прочности на растяжение при изгибе изоляционных растворов от 7,0 до 9,1 МПа прочность сцепления с бетонным основанием составила от 0,7 до 1,2 МПа, т.е. 0,1 – 0,13, а согласно [21], при применении некоторых ремонтных смесей прочность сцепления с бетонным основанием достигает 2,5-3,4 МПа при прочности на растяжение при изгибе 8-13 МПа, т.е. 0,26 - 0,31.

Вывод. При выдерживании до 120 сут в воздушно-сухих условиях возможно некоторое снижение предела прочности при сжатии, что не связано с влиянием РПП. Соотношение R_2/R_{28} снижается от 0,51 до 0,36 с ростом дозировки РПП до 3%, что свидетельствует о замедлении твердения в раннем возрасте при введении РПП.

В возрасте 2 сут на зависимость прочности при изгибе и начального модуля упругости от прочности при сжатии $R_f(E) = f(R)$ практически не влияют такие факторы, как состав КМД и содержание РПП. С ростом возраста строительного раствора при выдерживании в воздушно-сухих условиях прослеживается тенденция не только количественного, но и качественного изменения зависимости $R_f = f(R)$ при наличии в составе РПП, что позволяет сделать вывод о положительной роли РПП в повышении предела прочности при изгибе в указанных условиях.

С повышением дозировки РПП в возрасте 28 сут имеет место рост прочности сцепления с основанием, при выдерживании до 120 сут в воздушно-сухих условиях возможно снижение прочности сцепления до 25% в составах с РПП и опоккой и до 13% в составах с РПП и золой. Прочность сцепления со стандартным бетонным основанием составляет для составов с опоккой 0,08 – 0,22 от прочности при изгибе и 0,2 – 0,25 для составов с золой.

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. 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.
5. Логанина В.И. Сухие строительные смеси для реставрации зданий исторической застройки / В.И. Логанина // Региональная архитектура и строительство. 2015. № 3 (24). С. 34-42.
6. 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.
7. Несветаев Г.В., Козлов А.В., Козлов Г.А., Филонов И.А. Влияние некоторых минеральных добавок на свойства мелкозернистых бетонов // Инженерный вестник Дона. 2022. №11 URL: ivdon.ru/magazine/archive/n11y2022/7972.
8. 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.

9. Кузьмина, В.П. Наполнители для сухих строительных смесей // Сухие строительные смеси. 2017. № 3. С. 8-15.
10. Белов, В.В., Образцов И.В. Расчет плотных упаковок частиц в смесях тонкодисперсных компонентов // Сухие строительные смеси. 2014. № 3. С. 32-35.
11. Саламанова М.Ш., Исмаилова З.Х., Окуева П.Х., Эскиев М.С. Анализ методов составления рецептур модифицированных сухих строительных смесей // Грозненский естественнонаучный бюллетень. 2017. № 4(8). С. 67-72.
12. Василик П.Г., Голубев И.В. Обзор современных эфиров целлюлозы торговой марки Mecerlose для плиточных клеев на цементной основе // Сухие строительные смеси. 2012. № 1. С. 18-21.
13. 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.
14. Лесовик В.С., Загороднюк Л.Х., Куприна А.А. и др. Эффективные кладочные растворы для автоклавных стеновых материалов // Строительные материалы. 2016. № 12. С. 22-25.
15. Аласханов А.Х., Саламанова М.Ш., Бисултанов Р.Г., Юсупов С.С. Теоретические аспекты получения сухих строительных смесей на основе природных ресурсов Чеченской Республики // Теоретические основы создания эффективных композитов: Сборник материалов Российской онлайн-конференции, посвященной Дню науки. Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. 2018. С. 12-17.
16. Несветаев, Г.В., Осипов В.В. Прочность сцепления с различными основаниями модифицированных строительных растворов в зависимости от условий выдерживания // Инженерный вестник Дона. №4 (2023) ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2023/8333.
17. Бабков В.В., Чуйкин А.Е., Сеницын Д.А. и др. Исследование свойств модифицированных штукатурных составов, наносимых при отрицательных температурах на блоки из автоклавного газобетона // Сухие строительные смеси. 2012. № 4. С. 15-18.
18. Несветаев Г.В., Животкова И.А. Влияние некоторых минеральных добавок на свойства мелкозернистых бетонов и строительных растворов // Инженерный Вестник Дона, №5 (2024) ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2024/9200
19. Несветаев Г.В., Осипов В.В. О влиянии редиспергируемых полимерных порошков на модуль упругости и прочность сцепления строительных растворов // Инженерный вестник Дона. 2022. № 7(91).
20. Белых С.А., Кудряков 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.
21. 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.

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. Korovkin M.O., Korotkova A.A., Eroshkina N.A. Repair dry building mixes for restoring the geometric characteristics of reinforced concrete structures. *Education and Science in the Modern World. Innovations*. 2020;5 (30):122-128. (In Russ)
5. Loganina V.I. Dry building mixes for the restoration of historical buildings. *Regional Architecture and Construction*. 2015; 3 (24): 34-42. (In Russ)
6. 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.
7. Nesvetaev G.V., Kozlov A.V., Kozlov G.A., Filonov I.A. Influence of some mineral additives on the properties of fine-grained concrete. *Engineering Bulletin of the Don*. 2022;11 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2022/7972. (In Russ)
8. 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.
9. Kuzmina, V.P. Fillers for dry building mixtures. *Dry building mixtures*. 2017; 3: 8-15. (In Russ)
10. Belov, V.V., Obratsov I.V. Calculation of dense packings of particles in mixtures of finely dispersed components. *Dry building mixtures*. 2014; 3: 32-35. (In Russ)

11. Salamanova M.Sh., Ismailova Z.Kh., Okueva P.Kh., Eskiev M.S. Analysis of methods for compiling recipes for modified dry building mixtures. *Grozny Natural Science Bulletin*. 2017; 4(8): 67-72. (In Russ)
12. Vasilik P.G., Golubev I.V. Review of modern cellulose ethers of the Mecellose trademark for cement-based tile adhesives. *Dry building mixtures*. 2012;1:18-21. (In Russ)
13. 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 mixes*. 2016; 2:17-20. (In Russ)
14. Lesovik V.S., Zagorodnyuk L.Kh., Kuprina A.A. et al. Effective masonry mortars for autoclaved wall materials. *Construction materials*. 2016;12: 22-25. (In Russ)
15. Alaskhanov A.Kh., Salamanova M.Sh., Bisultanov R.G., Yusupov S.S. Theoretical aspects of obtaining dry building mixtures based on natural resources of the Chechen Republic. Theoretical foundations for creating effective composites: Collection of materials of the Russian online conference dedicated to the Day of Science. Belgorod: Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. 2018; 12-17. (In Russ)
16. Nesvetaev, G.V., Osipov V.V. Adhesion strength of modified building mortars to various bases depending on curing conditions. *Engineering Bulletin of the Don*. 2023;4 ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2023/833. (In Russ)
17. Babkov V.V., Chuikin A.E., Sinitsyn D.A. et al. Study of the properties of modified plaster compositions applied at negative temperatures to autoclaved aerated concrete blocks. *Dry building mixtures*. 2012; 4: 15-18. (In Russ)
18. Nesvetaev G.V., Zhivotkova I.A. Influence of some mineral additives on the properties of fine-grained concrete and mortars. *Engineering Bulletin of the Don*, 2024;5 ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2024/9200
19. Nesvetaev G.V., Osipov V.V. On the influence of redispersible polymer powders on the modulus of elasticity and adhesion strength of mortars. *Engineering Bulletin of the Don*. 2022; 7(91). (In Russ)
20. 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)
21. Narin S.Yu., Kronshtatov A.P. CONCOLIT BARS repair mortars for strengthening and restoring concrete structures and buildings. Special cements for concrete. *Dry building mixtures*. 2011; 6:13-15. (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. Gadzhimagomed, 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 21.09.2024.

Одобрена после рецензирования/ Revedicd 11.10.2024.

Принята в печать/Accepted for publication 05.11.2024.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 624.04

DOI: 10.21822/2073-6185-2024-51-4-226-235



Оригинальная статья / Original article

Об одном варианте физических зависимостей при моделировании развития линии отрыва здания от фундамента при выравнивании крена домкратами
Л.Н. Панасюк¹, М.В. Зотов^{1,2}, А.А. Фириченко¹, М.А. Магомедов³

¹Донской государственной технической университет,

¹344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1, Россия,

²ООО НПФ «Интербиотех»,

²344000, г. Ростов-на-Дону, ул. Портовая, 80/2, Россия,

³Дагестанский государственный технический университет,

³367015, г. Махачкала, пр. Имама Шамиля, 70, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является разработка уточненных методов расчета сооружений на деформируемых основаниях. Для достижения поставленной цели рассматривается задача о построении уточненных зависимостей между напряжениями и деформациями в физически нелинейном материале с учетом образования трещин. **Метод.** Использование уточненных механико-математических моделей позволит не только получить более достоверные результаты работы системы «сооружение – фундамент – деформируемое основание», но и корректно решить инженерную проблему проектирования усиления и процесса выравнивания. **Результат.** Для проектирования усиления цокольной и верхней части сооружения выполнено механико-математическое моделирование процесса образования линии отрыва при увеличении усилий в домкратах на основе физически нелинейной постановки задачи и применения уточненных физических зависимостей для тонкого слоя, в котором имеется адгезия между верхним строением и фундаментом. Обоснованы требования к механической модели процесса отрыва здания от фундамента при увеличении усилий на домкраты. **Вывод.** Сформулированы основные физические зависимости, определяющие процесс образования линии отрыва в слое адгезии. Приведенные зависимости позволяют учитывать конструктивную нелинейность, связанную с изменением расчетной схемы при постепенном отрыве здания от фундамента.

Ключевые слова: физическая нелинейность, трещинообразование, нормальное напряжение, касательное напряжение, компоненты деформаций, теория прочности, крены, разрушение, выравнивание

Для цитирования: Л.Н. Панасюк, М.В. Зотов, А.А. Фириченко, М.А. Магомедов. Об одном варианте физических зависимостей при моделировании развития линии отрыва здания от фундамента при выравнивании крена домкратами. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2024;51(4):226-235. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-4-226-235

On one variant of physical dependencies in modeling the development of the line of separation of a building from the foundation when leveling the tilt with jacks

L.N. Panasyuk¹, M.V. Zotov^{1,2}, A.A. Firichenko¹, M.A. Magomedov³

¹Don State Technical University,

¹1 Gagarin Square, Rostov-on-Don 344003, Russia,

²LLC NPF "Interbiotech",

²80/2 Portovaya St., Rostov-on-Don 344000, Russia,

³Daghestan State Technical University,

³70 I. Shamil Ave., Makhachkala 367015, Russia

Abstract. Objective. The aim of the study is to develop refined methods for calculating structures on deformable foundations. To achieve this objective, the problem of constructing refined dependencies between stresses and strains in a physically nonlinear material taking into account crack formation is considered. **Method.** The use of refined mechanical and mathematical models will allow not only to obtain more reliable results of the operation of the "structure - foundation - deformable base" system, but also to correctly solve the engineering problem of designing reinforcement and the leveling process. **Result.** To design the reinforcement of the basement and upper parts of the structure, mechanical and mathematical modeling of the process of tear-off line formation with increasing forces in jacks was performed based on a physically nonlinear statement of the problem and the use of refined physical dependencies for a thin layer in which there is adhesion between the superstructure and the foundation. The requirements for a mechanical model of the process of detaching a building from the foundation with increasing forces on jacks are substantiated. **Conclusion.** The main physical dependencies that determine the process of formation of the tear line in the adhesion layer are formulated, and also take into account the structural nonlinearity associated with the change in the calculation scheme during the gradual tearing of the building from the foundation.

Keywords: physical nonlinearity, cracking, normal stress, tangential stress, deformation components, strength theory, rolls, fracture, alignment

For citation: L.N. Panasyuk, M.V. Zotov, A.A. Firichenko, M.A. Magomedov. On one variant of physical dependencies in modeling the development of the line of separation of a building from the foundation when leveling the tilt with jacks. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2024;51(4):226-235. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-4-226-235

Введение. На многоэтажные здания в течение жизненного цикла действует ряд природных факторов, вызывающих неравномерные осадки основания. В свою очередь, здания также испытывают такие неравномерные деформации, как прогибы, крены и скручивание [1-18]. На возникновение неравномерных деформаций влияет множество различных факторов, которые определяются спектром объективных и субъективных факторов. Это могут быть грубые ошибки в процессе выполнения проектирования и изыскательских работ, ошибки при строительстве или эксплуатации здания. Однако применительно к конкретной специфике нового объекта определенные факторы могут оказать существенное влияние либо непосредственно, либо опосредованно [5-6].

Постановка задачи. На территории России и за рубежом, имеется множество зданий и сооружений, испытывающих значительные неравномерные деформации. Одним из методов восстановления эксплуатационной надежности является подъем просевшей части здания системой домкратов. Основными причинами кренов здания является неверный учет работы основания. Например, неравномерные осадки грунтового основания, оползневые процессы и т.п. Так, в ФРГ в земле Саарлэнд основная причина значительных неравномерных осадок – шахтные подработки. На Юге РФ одной из основных причин – просадочные грунты (рис. 1).



Рис. 1. Примеры кренов зданий от неравномерных осадок и оползневых процессов
Fig. 1. Examples of building tilts due to uneven settlement and landslide processes

Одним из методов, хорошо зарекомендовавшим в практике выравнивания зданий, является неравномерный подъем системой домкратов, установленных между фундаментом и цоколем здания. При подъеме здания наиболее ответственным является начальный момент, при котором на домкраты подают наибольшие усилия для преодоления связей между зданием и фундаментом – рис. 2.



Рис. 2. Варианты усиления и домкратных узлов
Fig. 2. Options for reinforcement and jacking units

Здесь одним из ответственных моментов является этап начального отрыва несущих конструкций здания от фундамента. При этом наблюдается максимальные усилия в домкратах, превышающие усилия после отрыва (в процессе устранения крена здания) до 40%. Это объясняется двумя факторами – необходимостью преодоления адгезии между стеновыми панелями и фундаментом и необходимостью обеспечения определенного линейного и углового ускорения для достижения определенных скоростей подъема. Опыт выравнивания зданий показал, что основной вклад в увеличение начальных усилий вносит адгезия. Это объясняется тем, что линейные скорости отдельных точек здания при выравнивании сравнительно низкие – порядка одного миллиметра в минуту, и они могут быть достигнуты за продолжительный интервал – несколько минут.

Отрыв здания от фундамента характеризуется непрерывным изменением расчетной схемы за счет постепенного выключения из работы отдельных связей между несущими цокольными конструкциями и фундаментом (рис. 3).



Рис. 3. Образование линии отрыва и ее развитие
Fig. 3. Formation of the tear line and its development

При этом цокольные конструкции ослаблены технологическими домкратными нишами. Как правило, в железобетонных цокольных панелях разрезается нижняя несущая арматура. Таким образом, здание работает по нехарактерной для него схеме с нарушенными несущими конструкциями и постепенным (достаточно быстрым) изменением условий опирания (от сплошного до дискретного на домкратах).

Для проектирования усиления цокольной и верхней части сооружения требуется выполнить механико-математическое моделирование процесса образования линии отрыва при увеличении усилий в домкратах. Для этого требуется использовать физически нелинейную постановку задачи и применять уточненные физические зависимости для тонкого слоя, в котором имеется адгезия между верхним строением и фундаментом.

Методы исследования. Важной задачей современной строительной механики является разработка уточненных методов расчета сооружений на деформируемых основаниях. Использование уточненных механико-математических моделей позволит не только

получить более достоверные результаты работы системы «сооружение – фундамент – деформируемое основание», но и корректно решить инженерную проблему проектирования усиления и процесса выравнивания. Разработка качественной механико-математической модели, описывающей работу различных объектов, невозможной без учета различных типов нелинейности. С.П. Тимошенко дополнительно предложил рассматривать конструктивную нелинейность [12]. В частности, необходимость учета физической, геометрической и конструктивной нелинейности возникает при моделировании систем, которые подвержены изменению расчетной схемы сооружения на разных этапах эволюции. Многочисленные экспериментальные исследования показали, что даже при малых перемещениях в поведении грунтового основания зависимости между напряжениями и деформациями имеют отклонения от линейной зависимости. Такого рода нелинейности при описании математических моделей поведения грунтовой среды учитываются нелинейной зависимостью между напряжениями и деформациями $\sigma \sim \varepsilon$.

Геометрическая нелинейность обуславливается значительными перемещениями и деформациями при динамических воздействиях. В процессе деформирования грунтового основания происходит разрушение старых и возникновение новых структурных связей, такого рода явления обуславливаются конструктивной нелинейностью.

В процессе выравнивания здания, при увеличении нагрузки на домкраты, отдельные участки в адгезионном слое, или в окрестности последнего, достигают предельного состояния. Нарушаются внутренние связи, вследствие чего увеличиваются взаимные перемещения между фундаментом и стенами здания. При построении модели требуется выполнить учет больших взаимных перемещений, описать достижение предельного равновесия материала в отдельных зонах и учесть изменение расчетной схемы вследствие конечного взаимного смещения фрагментов.

Гипотезы наступления предельного состояния в некотором малом объеме материала достаточно развиты, однако актуальным остается вопрос моделирования поведения объема при дальнейшем росте деформаций. Одной из постановок является учет образования трещин в процессе деформации расчетной области [13-17]. Выделение общих связей между напряжениями и деформациями в физически нелинейном материале с трещинами представляет собой сложную задачу. Появление трещин в процессе нагружения сооружения связано с разрушением материала, поэтому для получения приближенных зависимостей $\sigma \sim \varepsilon$ необходимо привлекать подходящую теорию прочности. Будем предполагать, что в материале существуют или могут возникнуть в процессе нагружения сооружения микротрещины, которые в состоянии близком к разрушению объединяются и формируют микротрещины.

Таким образом, условно выделены два уровня рассмотрения состояния материала: с микро- и макро трещинами. В обоих случаях предполагается, что деформация есть осреднённая характеристика и определяется некоторыми средним значением по объему. Наличие микротрещин в материале учитывается прочностными характеристиками $k(\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_n)$, $G(\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_j)$ магистральных трещин, привлекается подходящая феноменологическая теория прочности. Для выявления начала и характера локального разрушения материала можно использовать широко известную теорию прочности Надаи для материалов, характеризующихся разным сопротивлением растяжению и сжатию. Согласно которой уравнение предельной поверхности записывается в виде $\tau_{окт} = f(\sigma_{окт}, \mu_\sigma)$

Область прочного сопротивления материала находится внутри предельной поверхности:

$$\tau \leq f(\sigma_{окт}, \mu_\sigma) \quad (1)$$

$\sigma_{окт}(\tau_{окт})$ – нормальное (касательное) октаэдрическое напряжение; μ_σ – параметр Надаи-Лоде для напряжений.

Хотя феноменологический критерий разрушения (1) не может предсказать физическую картину процесса, но как показано в [12] имеется возможность определить характер разрушения. Для хрупко-пластичных материалов характерны два вида разрушения: от отрыва и от сдвига по опасным поверхностям скольжения. Линейная аппроксимация предельной зависимости (1) позволила выделить Филоненко-Бородичу М.М. начало разрушения от сдвига:

$$\left| \frac{d\tau_{okm}}{d\sigma_{okm}} \right| < \sqrt{\frac{2(3 + \mu^2\sigma)}{3 - \mu\sigma}} \quad (2)$$

и от отрыва (при отрыве (2) нарушается). При отрыве предполагается, что трещины образуются по главным площадкам, когда главные нормальные напряжения превысят так называемое усилие трещинообразования.

В реальном материале наличие трещин обуславливает большое число обобщенных координат, фактическое состояние которых невозможно измерить, и поэтому из всего многообразия факторов, сопутствующих такому механическому явлению, как разрушение, выбран один – принимается во внимание только статистический фактор. По берегу трещины полагается, что $\sigma_n = \tau = 0$ (σ_n – нормальное напряжение, перпендикулярное берегу трещины, τ – касательное напряжение по поверхности разрыва). Условие $\tau = 0$ в соответствие с принятой гипотезой об образовании трещин по главным площадкам выполняется автоматически.

В дальнейшем изложении предполагается, что в материале при любом напряженном состоянии возникают малые деформации и справедливы следующие соотношения сплошной среды: уравнения равновесия в напряжениях; зависимости между компонентами деформаций и компонентами перемещений; условие сплошности Сен-Венана в растрескавшемся материале выполняется для некоторых осредненных деформаций, т.е. предполагается, что материал в процессе разрушения разрыхляется и не имеет разрывов.

Физические зависимости определим в соответствие с принятыми гипотезами об образовании трещин. Для пространственной задачи в точках среды при разрушении от отрыва могут возникнуть следующие ситуации.

1. Пусть в окрестности некоторой точки произошло разрушение от отрыва. Первая появившаяся трещина расположена на площадке, перпендикулярной к наибольшему главному напряжению σ_1 . После образования трещины материал в окрестности рассматриваемой точки перестанет работать на растяжение по направлению первой главной оси, т.е. можно положить $\sigma_1 = 0$, и физические зависимости в главных осях запишутся так:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k + \frac{4}{3}g & k - \frac{2}{3}g & k - \frac{2}{3}g \\ k - \frac{2}{3}g & k + \frac{4}{3}g & k - \frac{2}{3}g \\ k - \frac{2}{3}g & k - \frac{2}{3}g & k + \frac{4}{3}g \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \end{Bmatrix} \quad (3)$$

$$\varepsilon_1 = -\frac{3k - 2G}{3k + 1G}(\varepsilon_2 + \varepsilon_3) \quad (4)$$

Подставим (4) в (3), получим:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_2 \\ \sigma_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{4g(3k + g)}{3k + 4g} & \frac{2g + (3k - 2g)}{3k + 4g} \\ \frac{2g(3k - 2g)}{3k + 4g} & \frac{4g(3k + 4g)}{3k + 4g} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \end{Bmatrix} \quad (5)$$

$$\sigma = D_{01} \varepsilon \quad (5a)$$

2. Две пересекающиеся трещины при разрушении от отрыва могут появиться либо одновременно, если $\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$ либо последовательно, если $\sigma_1 > \sigma_2 = 0 > \sigma_3$ или $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3 = 0$. В этом случае материал в окрестности рассматриваемой точки работает только по одной из главных осей, физические зависимости на главных осях имеют вид:

$$\begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} k + \frac{4}{3}g & k - \frac{2}{3}g & k - \frac{2}{3}g \\ k - \frac{2}{3}g & k + \frac{4}{3}g & k - \frac{2}{3}g \\ k - \frac{2}{3}g & k - \frac{2}{3}g & k + \frac{4}{3}g \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \end{pmatrix} \quad (6)$$

Из уравнений (6) имеем:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = -\frac{3k - g}{2(3k + g)} \varepsilon_3$$

Исключая ε_1 и ε_2 из уравнения (6), получим:

$$\delta_3 = \frac{9kg}{3k + g} \varepsilon_3 \quad (7)$$

3. Для трех взаимно перпендикулярных пересекающихся трещин при отрыве все главные напряжения полагаются равными нулю, и физические зависимости принимаются в виде:

$$\sigma_j = 0 \cdot \varepsilon_j \quad (8)$$

Где $\sigma_j^T = \{\sigma_1 \sigma_2 \sigma_3\}$; $\varepsilon_j^T = \{\varepsilon_1 \varepsilon_2 \varepsilon_3\}$

Положение главных осей 1,2,3 относительно произвольной декартовой системы координат x,y,z определяется с помощью направляющих конусов:

	1	2	3
x	L ₁	M ₁	N ₁
y	L ₂	M ₂	N ₂
z	L ₃	M ₃	N ₃

Связь между напряжениями и деформациями, определенная в главных осях для среды с трещинами формулами (5 - 8), может быть записана в произвольной декартовой системе координат x, y, z, с помощью известных формул преобразования.

$$\sigma = L^t \cdot \sigma_j$$

$$\varepsilon_j = L \cdot \varepsilon$$

$$L = \begin{Bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ L_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} L_1^2 & L_2^2 & L_3^2 & L_1 L_2 & L_1 L_3 & L_2 L_3 \\ M_1^2 & M_2^2 & M_3^2 & M_1 M_2 & M_1 M_3 & M_2 M_3 \\ N_1^2 & N_2^2 & N_3^2 & N_1 N_2 & N_1 N_3 & N_2 N_3 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Принимая во внимание (9), зависимости (5), (7), (8) запишем в следующем виде:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11}^k & B_{12}^k & B_{13}^k & B_{14}^k & B_{15}^k & B_{16}^k \\ & B_{22}^k & B_{23}^k & B_{24}^k & B_{25}^k & B_{26}^k \\ & & B_{33}^k & B_{34}^k & B_{35}^k & B_{36}^k \\ & & & B_{44}^k & B_{45}^k & B_{46}^k \\ & & & & B_{55}^k & B_{56}^k \\ & & & & & B_{66}^k \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yz} \end{Bmatrix} \text{ или } \sigma = B^k \varepsilon \quad (10)$$

При K=1 (через точку среды проходит одна трещина) элементы матрицы. В₁ определяется по формулам:

$$B_{11} = a_1(m_1^4 + n_1^4) + 2a_2 n_1^2 m_1^2;$$

$$\begin{aligned}
 B_{12} &= a_1(n_1^2 n_2^2 + m_1^2 m_2^2) + a_2(m_1^2 n_1^2 + m_2^2 n_1^2); \\
 B_{13} &= a_1(n_1^2 n_3^2 + m_1^2 m_3^2) + a_2(m_1^2 n_3^2 + m_3^2 n_1^2); \\
 B_{14} &= a_1(n_1^3 n_2 + m_1^3 m_2) + a_2 n_1 m_1 (m_1 n_2 + n_1 m_2); \\
 B_{15} &= a_1(n_1^3 n_3 + m_1^3 m_3) + a_2 n_1 m_1 (n_3 m_1 + n_1 m_3); \\
 B_{16} &= a_1(n_1^2 n_2 n_3 + m_1^2 m_2 m_3) + a_2(m_1^2 n_2 n_3 + m_2 m_3 n_1^2); \\
 B_{22} &= a_1(n_2^4 + m_2^4) + 2a_2 n_2^2 m_2^2; \\
 B_{23} &= a_1(n_2^2 n_3^2 + m_2^2 m_3^2) + a_2(m_1^2 n_3^2 + n_2^2 m_3^2); \\
 B_{24} &= a_1(n_1 n_2^3 + m_1 m_2^3) + a_2(n_1 n_2 m_1^2 + m_1 m_2 n_2^2); \\
 B_{25} &= a_1(n_1 n_2^2 n_3 + m_1 m_2^2 m_3) + a_2(n_1 n_3 m_2^2 + m_1 n_2^2 m_3); \\
 B_{26} &= a_1(n_2^3 n_3 + m_2^3 m_3) + a_2(n_2 n_3 m_1^2 + n_2^2 m_2 m_3); \\
 B_{33} &= a_1(n_3^4 + m_3^4) + 2a_2 n_3^2 m_3^2; \\
 B_{34} &= a_1(n_1 n_3^3 + m_1 m_3^3) + a_2(n_1 n_2 m_3^2 + m_1 m_3 n_3^2); \\
 B_{35} &= a_1(n_1 n_2 n_3^2 + m_1 m_2 m_3^2) + a_2(n_1 n_2 m_3^2 + m_1 m_2 m_3^2); \\
 B_{36} &= a_1(n_2 n_3^3 + m_2 m_3^3) + a_2(n_2 n_3 m_3^2 + m_2 m_3 m_3^2); \\
 B_{44} &= a_1(n_1^2 n_2^2 + m_1^2 m_2^2) + 2a_2 m_1 m_2 n_1 n_2; \\
 B_{45} &= a_1(n_1^2 n_2 n_3 + m_1^2 m_2 m_3) + a_2(n_1 n_3 m_1 m_2 + n_1 n_2 m_1 m_3); \\
 B_{46} &= a_1(n_1 n_2^2 n_3 + m_1 m_2^2 m_3) + a_2 n_2 m_2 (n_3 m_1 + n_1 m_3); \\
 B_{55} &= a_1(n_1^2 n_3^2 + m_1^2 m_3^2) 2a_2 n_1 n_3 m_1 m_3; \\
 B_{56} &= a_1(n_1 n_2 n_3^2 + m_1 m_2 m_3^2) + a_2 n_2 m_3 (n_2 m_1 + n_1 m_3); \\
 B_{66} &= a_1(n_2^2 n_3^2 + m_2^2 m_3^2) + 2a_2 n_2 n_3 m_2 m_3; \\
 a_1 &= \frac{4g(3k + g)}{3k + 4g}; a_2 = \frac{2g(3k - 2g)}{3k + 4g}
 \end{aligned}$$

При $K=2$ (через точку среды проходят две ортогональные трещины).

$$\begin{aligned}
 B_{11} &= E^* \cdot N_1^4; B_{12} = E^* N_1^2 N_2^2; B_{13} = E^* N_1^2 N_3^2; B_{14} = E^* N_1^3 N_2; B_{15} = E^* N_1^2 N_3; \\
 B_{16} &= E^* N_1^2 N_2 N_3; B_{22} = E^* N_2^4; B_{23} = E^* N_2^2 N_3^2; B_{24} = E^* N_1 N_2^3; B_{25} = E^* N_1 N_2^2 N_3; \\
 B_{26} &= E^* N_2^3 N_3; B_{33} = E^* N_3^4; B_{34} = E^* N_1 N_2 N_3^2; B_{35} = E^* N_1 N_3^3; B_{36} = E^* N_2 N_3^3; \\
 B_{44} &= E^* N_1^2 N_2^2; B_{45} = E^* N_1^2 N_2 N_3; B_{46} = E^* N_1 N_2^2 N_3; B_{55} = E^* N_1^2 N_3^2 \\
 B_{56} &= E^* N_1 N_2 N_3^2; B_{66} = E^* N_2^2 N_3^2;
 \end{aligned}$$

$$E^* = \frac{9GK}{3K + G}$$

При $K=3$ (полное исчерпание несущей способности материала в точке). $B_j = 0$.

K зависимостям (10) при $K = 1, 2, 3$ необходимо добавить (11), т.е. физические управления для материала без трещин, в дальнейшем будем полагать, что $B = D_0$

При разрушении от сдвига равно возможно появление в окрестности точки двух не ортогональных трещин, возникающих по площадкам, которые проходят через ось среднего по величине главного напряжения. В этом случае полагаем, что скольжение происходит по идеально гладкой поверхности и поэтому после выявления подобного типа разрушения полагаем $\sigma_1 = \sigma_3 = 0$ и физический закон принимается в форме (10) при $K=2$.

Итак, при деформировании сооружения с учетом разрушения выше были выделены четыре типа напряженных состояний. Охарактеризовать их можно следующим образом. Первый тип, материал не разрушается, в окрестности точки возникает трехосное напряженное состояние. Второй тип, материал в окрестности точки имеет одну трещину - двухосное напряженное состояние. Третий тип, материал разрушился от отрыва или сдвига, в окрестности точки имеются две пересекающиеся трещины - одноосное напряженное состояние. Для четвертого типа в окрестности точки наступает полное исчерпание несущей способности материала, полное разрушение. Из трехосного напряженного состояния I, могут возникнуть двухосное или одноосное напряженное состояние путем разрушения материала от отрыва или сдвига. Из состояния II можем возникнуть состояние III от отрыва и состояние IV при разрушении от сдвига. Из состояния III при любом характере разрушения возникает состояние IV, соответствующие полностью разрушенному материалу в окрестности точки.

Обсуждение результатов. В заключении отметим, что полученные приближенные физические зависимости для материала с трещинами имеют анизотропный характер. Причем направление оси анизотропии зависит от положения главных осей и поэтому меняется от точки к точке. Нелинейность связи $\sigma \sim \varepsilon$ обусловлена не только зависимостью физических характеристик $G(\varepsilon_j \cdot \varepsilon_0)$, $K(\varepsilon_j \cdot \varepsilon_0)$ от инвариантов деформации, но и направляющие косинусы L_j, M_j, N_j , также являются функциями компонент вектора деформации:

$$L_j = \Delta L_j \lambda_j; M_j = \Delta M_j \lambda_j; N_j = \Delta N_j \lambda_j; \quad (11)$$

В формулах (11):

$$\Delta L_j = \frac{1}{4} \gamma_{xy} \gamma_{xz} - \frac{1}{2} \gamma_{xz} (\varepsilon_y - \varepsilon_j);$$

$$\Delta M_j = \frac{1}{4} \gamma_{xy} \gamma_{xz} - \frac{1}{2} \gamma_{yz} (\varepsilon_x - \varepsilon_j);$$

$$\Delta N_j = (\varepsilon_x - \varepsilon_j)(\varepsilon_y - \varepsilon_j) - \frac{1}{4} \gamma_{xy}^2$$

$$\lambda_j = 1 \cdot (\Delta^2 L_j + \Delta^2 M_j + \Delta^2 N_j)^{\frac{1}{2}}, (j = 1, 2, 3)$$

На рис. 4 показан пример использования программного комплекса ПОЛЮС при моделировании процесса выравнивания здания. Рассмотрен начальный вариант модели, в котором не учитывалось усиление стен. Показан фрагмент стены на одном из этапов увеличения нагрузки на домкраты (60% усилия). Отчетливо видно образование линии отрыва по нижнему образу стен, а также образование зон разрушения стены в окрестностях оконных и дверных проемов, что позволяет уточнить инженерные решения при усилении здания.



Рис. 4. Пример поэтапного образования линии отрыва и зон разрушения в стенах на этапе подъёма здания (фрагмент)

Fig. 4. An example of the stage-by-stage formation of a tear line and destruction zones in walls during the building's rise (fragment)

Вывод. Обоснованы требования к механической модели, моделирующей процесс отрыва здания от фундамента при увеличении усилий на домкраты.

Сформулированы основные физические зависимости, определяющие процесс образования линии отрыва в слое адгезии. Также возможен учет разрушения в фрагментах стен над домкратными нишами. Приведенные зависимости позволяют учитывать конструктивную нелинейность, связанную с изменением расчетной схемы при постепенном отрыве здания от фундамента.

Библиографический список:

1. Махвиладзе Л.С., Шерадзе Г., Зотов В.Д., Болотов Ю.К. Восстановление эксплуатационной надежности аварийных зданий. – «Инженерные проблемы Грузии: состояние и перспективы». – Тбилиси: Инженерная академия Грузии, 1998 – С.121-123.
2. Лобов О.И., Гапеев В.И., Зотов В.Д., Болотов Ю.К., Зотов М.В. Подъем и выравнивание аварийных зданий. «Промышленное и гражданское строительство». – М., 1999.- С.14-16.
3. Зотов М.В., Кутасов И.А., Скибин М.Г., Фириченко А.А. Технологические особенности устранения сверхнормативных кренов заблокированных зданий различной этажности.- «Основания, фундаменты и механика грунтов».-М., 2015.-С.11-14
4. Панасюк Л.Н., Труфанова Е.В. Применение программного комплекса "Клен-МКД" для расчетов в нелинейной постановке. Актуальные проблемы науки и техники. Ростов-на-Дону, 2024.-953-954с.
5. Панасюк Л.Н., Тюрина В.С., Чубка Ю.Ш. Моделирование работы подкрепленных оползневых склонов методом конечных элементов //Инженерный Вестник Дона.-2016, № 3. <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2016/3733>
6. Панасюк Л.Н., Зотова Е.В., Хо Чантхо, Акопян В.Ф. Определение влияния вспомогательного ростверка на несущую способность свай усиления цокольного здания с учетом неравномерной осадки в г. Белово Кемеровской области.Инженерный вестник Дона, Ростов-на-Дону, 2013, № 2, С. 131
7. Пшеничкина В.А., Гордеев С.С., Иванов М.А. Мониторинг зданий, риски, безопасность строительных объектов, мониторинг строительных конструкций.-Материалы международной научно-практической конференции «Малозэтажное строительство». Волгоград: ВГАСУ, 2009. 484 с.
8. Панасюк Л.Н., Тюрина В.С., Чубка Ю.Ш., Пошев А.У-Б. Моделирование работы оползневых склонов при динамическом воздействии // Инженерный Вестник Дона. 2018. № 2 <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2018/4901>
9. Панасюк Л.Н., Тюрина В.С., Савельева Н.А., Чубка Ю.Ш. Динамическая реакция в системе "дорожная конструкция - оползневой склон" от движения транспорта//Инженерный Вестник Дона . 2018. № 4 <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5376>
10. Панасюк Л.Н., Войтов А.А. Оптимальное моделирование строительных конструкций// Ростов-на-Дону.: ДГТУ, 2022. С. 284-285.
11. Panasyuk L.N., Kravchenko G.M. Stability of direct circuits integrating the equations of motion in the simulation of the dynamics of destruction // MATEC «Web of Conferences» 2017
12. Panasuk L.N., Kravchenko G.M., Trufanova E.V. Researching design solutions for frames of buildings in case of increased seismic intensity in specific zones // Matec Web of Conferences. 2017 №106. DOI: doi.org/10.1051/mateconf/201710602027
13. Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела. М.: Наука, 1979. 650 с.
14. Ржаницын А.Р. Расчет сооружений с учетом пластических свойств материала. М.: Госстройиздат. 1954. 129 с.
15. Васильков Г.В., Панасюк Л.Н., Фахми Загер. О методе предельного равновесия. Ростов н/Д.: РИСИ. Деп в ВИНТИ 07.06.92. №1838-В92. 1992. 21 с.
16. Васильков Г.В., Панасюк Л.Н., А.А.Аль-Тахиш. Определение предельных нагрузок для неоднородных вязкоупругопластических рам. Ростов-на-Дону. РИСИ. Деп в ВИНТИ №1169-В93. 1993. 21с.
17. Писаренко Г.С., Лебедев А.А. Сопrotивление материалов деформированию и разрушению при сложном напряженном состоянии. К.: Наукова думка, 1969. 211 с.
18. Филоненко-Бородич М.М. Механические теории прочности. М.: изд. МГУ, 1961. 91 с.
19. Панасюк Л.Н. О построении явных безусловно устойчивых схем прямого интегрирования задачи динамики сооружений// Известия вузов. Строительство, 1995. № 10, С. 35-40.

References:

1. Makhviladze L.S., Sheradze G., Zotov V.D., Bolotov Yu.K. Restoration of operational reliability of emergency buildings. Engineering problems of Georgia: status and prospects. Tbilisi: Engineering Academy of Georgia, 1998;121-123.
2. Lobov O.I., Gapeev V.I., Zotov V.D., Bolotov Yu.K., Zotov M.V. Lifting and leveling emergency buildings. Industrial and civil construction. Moscow:, 1999;14-16. (In Russ)

3. Zotov M.V., Kutasov I.A., Skibin M.G., Firichenko A.A. Technological features of eliminating excessive tilts of semi-detached buildings of different number of storeys. Foundations, foundations and soil mechanics. Moscow, 2015;11-14(In Russ)
4. Panasyuk L.N., Trufanova E.V. Application of the software package "Klen-MKD" for calculations in a nonlinear formulation. Actual problems of science and technology. Rostov-on-Don, 2024;953-954(In Russ)
5. Panasyuk L.N., Tyurina V.S., Chubka Yu.Sh. Modeling the work of reinforced landslide slopes by the finite element method. *Engineering Bulletin of the Don*. 2016;3. <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n3y2016/3733>(In Russ)
6. Panasyuk L.N., Zotova E.V., Ho Chantho, Akopyan V.F. Determining the influence of an auxiliary grillage on the bearing capacity of a pile for reinforcing a basement building, taking into account uneven settlement in Belovo, Kemerovo Region. *Engineering Bulletin of the Don*, Rostov-on-Don, 2013; 2:131(In Russ)
7. Pshenichkina V.A., Gordeev S.S., Ivanov M.A. Monitoring of buildings, risks, safety of construction projects, monitoring of building structures. Proceedings of the international scientific and practical conference "Low-rise construction". Volgograd: VSUACE, 2009;484(In Russ)
8. Panasyuk L.N., Tyurina V.S., Chubka Yu.Sh., Poshev A.U-B. Modeling the work of landslide slopes under dynamic impact. *Engineering Bulletin of the Don*. 2018; 2 <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/N2y2018/4901>(In Russ)
9. Panasyuk L.N., Tyurina V.S., Savelyeva N.A., Chubka Yu.Sh. Dynamic response in the system "road structure - landslide slope" from traffic. *Engineering Bulletin of the Don*. 2018;4 <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n4y2018/5376> (In Russ)
10. Panasyuk L.N., Voitov A.A. Optimal modeling of building structures. Rostov-on-Don.: DSTU, 2022; 284-285. (In Russ)
11. Panasyuk L.N., Kravchenko G.M. Stability of direct circuits integrating the equations of motion in the simulation of the dynamics of destruction. MATEC «Web of Conferences» 2017
12. Panasuk L.N., Kravchenko G.M., Trufanova E.V. Researching design solutions for frames of buildings in the case of increased seismic intensity in specific zones. Matec Web of Conferences. 2017 № 106. DOI: doi.org/10.1051/mateconf/201710602027
13. Rabotnov Yu.N. Mechanics of a deformable solid body. Moscow: Nauka, 1979; 650. (In Russ)
14. Rzhantsyn A.R. Calculation of structures taking into account the plastic properties of the material. Moscow: Gosstroyizdat. 1954;129. (In Russ)
15. Vasilkov G.V., Panasyuk L.N., Fahmi Zager. On the limit equilibrium method. Rostov n. D: RISI. Dep in VINITI 07.06.92. No. 1838-B92. 1992;21. (In Russ)
16. Vasilkov G.V., Panasyuk L.N., A.A. Al-Takhish. Determination of ultimate loads for heterogeneous viscoelastic-plastic frames. Rostov-on-Don: RISI. Dep in VINITI No. 1169-B93. 1993; 21. (In Russ)
17. Pisarenko G.S., Lebedev A.A. Resistance of materials to deformation and failure under complex stress state. K.: Naukova Dumka, 1969; 211. (In Russ)
18. Filonenko-Borodich M.M. Mechanical theories of strength. M.: Moscow State University Press, 1961;91. (In Russ)
19. Panasyuk L.N. On the construction of explicit unconditionally stable schemes for direct integration of the problem of the dynamics of structures. *News of universities. Construction*, 1995; 10: 35-40. (In Russ)

Сведения об авторах:

Панасюк Леонид Николаевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Строительная механика и теория сооружений», Panasyuk.leonid@gmail.com

Зотов Михаил Витальевич, кандидат технических наук, доцент, генеральный директор ООО НПФ «Интербиотех»; pinterbiotech@mail.ru

Фириченко Андрей Александрович, аспирант кафедры «Строительная механика и теория сооружений», Магомедов Марсель Айдемирович, аспирант кафедры «Строительная механика»; marsmag05@ya.ru. ORCID 0000-0001-5517-919X;

Information about authors:

Leonid N. Panasiuk, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Prof., Head of the Department of Structural Mechanics and Theory of Structures; Panasyuk.leonid@gmail.com

Mikhail V. Zotov, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., General Director of NPF Interbiotech LLC; pinterbiotech@mail.ru

Andrey A. Firichenko, Postgraduate, Department of Structural Mechanics and Theory of Structures

Marcel A. Magomedov, Postgraduate, 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 11.09.2024.

Одобрена после рецензирования/ Revided 10.10.2024.

Принята в печать/Accepted for publication 06.11.2024.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 624.04

DOI: 10.21822/2073-6185-2024-51-4-236-248



Оригинальная статья /Original article

Расчетные модели балок 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. В статье рассматриваются особенности работы балочных конструкций, обладающих односторонними связями. **Метод.** Путём исследования особенностей работы опор балочных конструкций выводятся аналитические и графические зависимости между перемещениями балок и реакциями их опор. Используются свойства обобщённых функций, которые позволяют описывать нелинейности, проявляющиеся при деформациях конструкций. Приводятся дифференциальные уравнения поперечного изгиба балок, учитывающие нелинейности и методы их решения. **Результат.** Разработаны конструктивные и расчётные схемы, учитывающие работу опор балочных конструкций, позволяющие получать на этом основании более точные значения прогибов и внутренних усилий сечений, что обеспечивает необходимую надёжность работы конструкции. Результаты даются в виде аналитических выражений графиков и таблиц. **Вывод.** Расчётные модели балок с односторонними связями могут найти широкое применение при проектировании балочных конструкций, имеющих опоры с односторонними связями.

Ключевые слова: балки, 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. Расчётные 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

Calculation models of beams with one-way connections

A.K. Yusupov, Kh.M. Muselemov, R.I. Vishtalov

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

Abstract. Objective. The article considers the operational features of beam structures with one-way ties. **Method.** By studying the operational features of beam structure supports, analytical and graphical dependencies between beam displacements and their support reactions are derived. The properties of generalized functions are used to describe the nonlinearities that occur during structural deformations. Differential equations for transverse bending of beams are presented, taking into account nonlinearities and methods for their solution. **Result.** Design and calculation schemes have been developed that take into account the operation of beam structure supports, allowing us to obtain precise values of deflections and internal forces of sections on this basis, which ensures the necessary reliability of the structure. The results are given in the form of analytical expressions, graphs, and tables. **Conclusion.** Calculation models of beams with one-way connections can find wide application in the design of beam structures with supports with one-way connections.

Keywords: beams, supports, one-way 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 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

Введение. В практике проектирования и строительства встречаются сложные ситуации, в которых связь между реакциями опор и прогибами балки описываются нелинейными функциями [1, 2]. Причем, опора вступает в работу не сразу, а только при достижении прогибами определённого их значения. При этом некоторые опоры на определенном уровне напряженного состояния разрушаются и выходят из строя, то есть связь отключается, и балка теряет опору [3-6]. При этом расчетная схема балки существенно меняется. Учет влияния особенностей работы односторонних связей на работу балочных конструкций дает существенную поправку в величинах перемещений и внутренних усилий (изгибающих моментов, поперечных сил, осевых усилий, крутящих моментов в сечениях балок) [7, 8]. На рис. 1 приведена конструктивная схема балочной фермы, лежащая на промежуточной опоре, которая работает при положительных прогибах конструкции.



Рис.1. Конструктивная схема

Fig. 1. Structural diagram

На рис. 2 приводятся конструктивные схемы шпренгельной балки с одной стойкой. Поскольку растяжки шпренгельной балки – гибкие, то при отрицательных перемещениях горизонтальной переключины, вертикальная стойка шпренгельной балки не оказывает сопротивления прогибам. Это стойка работает только при положительных прогибах. Другими словами, горизонтальная переключина шпренгельной балки в середине пролета имеет одностороннюю связь.

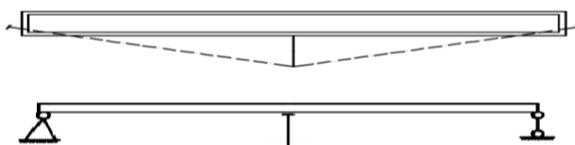


Рис. 2. Конструктивная и расчётная схемы

Fig. 2. Design and calculation schemes

На рис. 3 дается конструктивная схема неразрезного балочного моста вблизи Монтабаре (ФРГ). Промежуточные опоры работают, когда пролетное строение моста получает положительные перемещения по вертикали (прогибы). При отрицательных прогибах промежуточные колонны не оказывают сопротивления прогибам, то есть опоры обладают односторонними связями [1, 2].

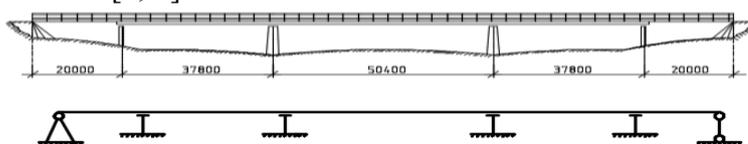


Рис. 3. Конструктивная и расчётная схемы

Fig. 3. Design and calculation schemes

Постановка задачи. Как обычно, при расчёте и компоновке балочных конструкций их опоры рассматриваются как линейные системы. И для описания особенностей работы этих опор пользуются моделью Винклера. Как уже было показано в предыдущих примерах, работа опор балочных конструкций далеко не всегда подчиняется линейным зависимостям: эти зависимости существенно нелинейны и для их описания необходимо пользоваться обобщёнными функциями, которые позволяют учитывать дискретность опор

и скачкообразные изменения их реакций. Обычные функции не позволяют проделать эти процедуры. В данной статье разработаны алгоритмы с использованием обобщённых функций, что позволяет вводить в дифференциальные уравнения поперечного изгиба балок соответствующие звенья.

Таким образом, уравнения приспособляются к особенностям работы опор балок с односторонними связями. Всё это позволяет путём решения этих дифференциальных уравнений получать значения перемещений и внутренних усилий в сечениях балок с учётом особенностей работы опор.

Методы исследования. В инженерной практике нередко встречаются конструкции, имеющие односторонние связи. К таким односторонним связям можно отнести опоры, которые допускают перемещения или только вверх или только вниз.

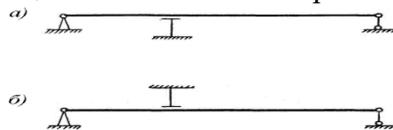


Рис.4. Расчётные схемы балки с односторонней связью
Fig.4. Calculation schemes of a beam with a one-way connection

На рис.4а показана балка со средней опорой, представляющей собой одностороннюю связь. На средней опоре балка может перемещаться только вверх. На схеме «б» рис. 4 приведена другая ситуация: здесь средняя опора допускает прогибы балки только вниз.

На рис.5 показаны связи (опоры), которые включаются в работу не сразу (не с нуля), а прежде допускают возрастание перемещения балки на опоре до определенного уровня u_1 . Только после достижения перемещениями этого уровня связь включается в работу.

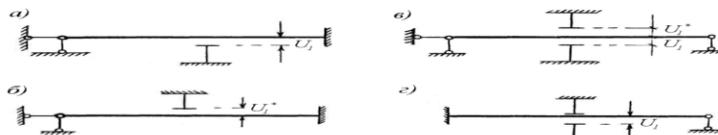


Рис. 5. Расчётные схемы балки с включающимися связями
Fig. 5. Calculation schemes of a beam with included connections

Связи с такими свойствами обычно называют включающимися. Этот термин вполне соответствует их особенности: связь включается в работу при достижении перемещениями определенного уровня u . Варианты односторонних связей показаны на рис. 5.

Рассмотрим балки, с так называемыми, выключающимися связями. Эти связи занимают противоположный полюс по отношению к рассмотренным выше. Включающиеся связи начинают препятствовать перемещениям балки не с самого начала развития прогибов, а вовлекаются в работу только при достижении перемещениями определенного уровня u , и наоборот, выключающиеся связи участвуют в работе балки с самого начала, с самых малых перемещений и выключаются из работы при достижении перемещениями или напряжениями, или внутренними усилиями определенного обобщенного уровня R . Однако и включающиеся, и выключающиеся связи служат для одной и той же цели: изменению структуры системы (в нашем случае балочной системы). Причем подбирая уровни u и R , о которых говорилось выше, можно [1] заранее «запрограммировать» режим изменения структуры (жесткости) балочной конструкции таким образом, чтобы приспособить работу балки к изменениям внешних сил $q(x)$. При этом обычно исходят из каких-то дополнительных требований, накладываемых на конструкцию условиями эксплуатации. Связи включающиеся и выключающиеся, и их комбинации находят широкое применение при проектировании различных система, в частности, при проектировании сейсмостойких конструкций, то есть при разработке адаптирующихся (приспосабливающихся) систем.

На рис. 6 приведены схемы выключающихся связей. На рис. 6а средняя опора – выключающаяся. Она показана пунктирной линией. Когда реакция этой опоры X дости-

гает величины R ($X = R$), опора выключается (разрушается), и балка приобретает новую структуру: балка работает по рис. 6б.

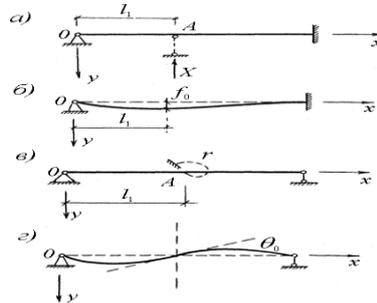


Рис. 6. Расчётные схемы балки с выключающимися связями
Fig. 6. Calculation schemes of a beam with switching connections

На рис. 6в пунктиром показана выключающаяся связь, которая перестает препятствовать повороту балки тогда, когда возникающий в ее сечении ($x = l_1$) изгибающий момент $M(l_1) = -EJ \cdot y''(l_1)$ становится равным R . После выключения этой связи балка начинает работать по другой схеме, приведенной на рис. 6г.

Далее условимся: выключающиеся связи, как и здесь, показывать пунктирной линией, а включающиеся и обычные связи – сплошной. Рассмотрим алгоритм построения функции прогибов $y(x)$ и внутренних усилий $M(x)$, $Q(x)$ в сечениях балки (рис. 7а). Запишем дифференциальное уравнение поперечного изгиба балки (рис. 7б) под воздействием внешней поперечной нагрузки $q(x)$. Это уравнение имеет вид [3, 6]

$$EJ y^{IV}(x) = q(x) - X_l \cdot \delta(x - l_l), \quad (1)$$

где EJ – жесткость поперечного сечения балки, $y(x)$ – функция прогибов, X_l – реактивная сила на средней опоре.

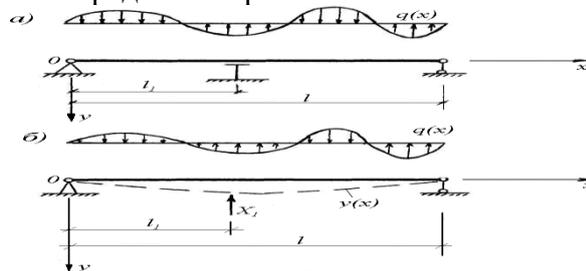


Рис. 7. Расчётные схемы балки с включающейся связью
Fig. 7. Calculation schemes of a beam with a switching connection

От заданной системы (рис. 7а) перейдем к основной (рис. 7б). Поскольку крайние опоры заданной балки шарнирные, то функция Грина должна отвечать шарнирным граничным условиям на концах балки. Поэтому достаточно вместо средней односторонней опоры в основную систему ввести реактивную силу X_l , сохранив при этом крайние опоры без изменения.

Для определения силы X_l необходимо иметь условие совместности деформаций на опоре. Заметим, что средняя опора (см. рис. 7а) – односторонняя, связь препятствует перемещению балки «вниз» и допускает свободные перемещения «вверх». Очевидно при $y(l) \geq 0$ в основной системе (рис. 7б) к балке прикладывается сила X_l , а когда перемещение $y(l) \leq 0$ реакция опоры X_l обращается в нуль. Такие избирательные свойства односторонней связи можно моделировать с помощью единичной функции. Поэтому условие совместности деформаций, вернее условие совместности прогибов, на средней опоре запишем виде:

$$y(l) = y(l) - y(l) \cdot e[y(l)]. \quad (2)$$

$e(x)$ – единичная функция

Здесь: $y(l)$ – перемещение балки в точке $x = l$ (см. рис. 7). Из условия (2) следует:

$$1. \text{ при } y(l_1) \geq 0: \quad y(l_1) = y(l_1) - y(l_1) \cdot 1$$

$$\text{или } y(l_1) = 0 \quad (3)$$

$$2. \text{ при } y(l_1) < 0: \quad y(l_1) = y(l_1) - y(l_1) \cdot 0$$

$$\text{или } y(l_1) \equiv y(l_1). \quad (4)$$

Таким образом, в зависимости от знака прогиба $y(l_1)$ условие (2) вырождается в уравнение (3) или в тождество (4)

Рассматриваемый пример – простейший: балка содержит только одну одностороннюю связь (рис. 7а). Поэтому неизвестную X_1 , входящую в уравнение (1), можно определить, как обычно, пользуясь уравнением совместности деформаций (3). Однако, мы здесь поступим иначе: на примере рассматриваемой простейшей задачи изложим алгоритм, пригодный и для сложных систем, когда число односторонних связей велико, а характер работы отдельных связей – различный.

Решение уравнения (1) представим в интегральной форме:

$$y(x) = \int_0^l G(x, \xi) \cdot [q(\xi) - X_1 \cdot \delta(\xi - l_1)] d\xi.$$

$$\text{или} \quad y(x) = y_0(x) - X_1 \cdot G(x, l_1), \quad (5)$$

$$\text{где введено обозначение} \quad y_0(x) = \int_0^l G(x, \xi) \cdot q(\xi) d\xi. \quad (6)$$

$G(x, \xi)$ – функция Грина.

Для определения неизвестной реакции X_1 воспользуемся условием совместности деформаций (прогибов) на опоре (2). Поскольку выражение (2) содержит единичную функцию, то условие совместности деформаций (3.2) представляет собой нелинейное уравнение. Находить решение нелинейных уравнений обычными способами не удастся. Единственный и универсальный метод, «работающий» при построении решения нелинейных уравнений, – это метод последовательных приближений (итераций) в различных его модификациях. Поэтому условие (3.2) представим в итерационном режиме:

$$y_{n+1}(l_1) = y_n(l_1) - y_n(l_1) \cdot e [y_n(l_1)], \quad (7)$$

где $n = 0, 1, 2, 3, \dots$ – шаг итераций. Из функции прогибов (5) найдем

$$y_n(x) = y_0(x) - X_1^{(n)} \cdot G(x, l_1), \quad (8)$$

$$y_{n+1}(x) = y_0(x) - X_1^{(n+1)} \cdot G(x, l_1). \quad (9)$$

Теперь, подставляя выражения (8) и (9) в итерационное уравнение (7), имеем

$$y_0(l_1) - X_1^{(n+1)} \cdot G(l_1, l_1) = y_0(l_1) - X_1^{(n)} \cdot G(l_1, l_1) -$$

$$- [y_0(l_1) - X_1^{(n)} \cdot G(l_1, l_1)] \cdot e [y_0(l_1) - X_1^{(n)} \cdot G(l_1, l_1)],$$

или

$$X_1^{(n+1)} \cdot G(l_1, l_1) = X_1^{(n)} \cdot G(l_1, l_1) +$$

$$+ [y_0(l_1) - X_1^{(n)} \cdot G(l_1, l_1)] \cdot e [y_0(l_1) - X_1^{(n)} \cdot G(l_1, l_1)], \quad (10)$$

где $n = 0, 1, 2, 3, \dots$ – шаг итераций.

Величину прогиба $y_0(l_1)$ легко вычислить с помощью интеграла (6):

$$y_0(l_1) = \int_0^l G(l_1, \xi) \cdot q(\xi) d\xi. \quad (11)$$

Таким образом, мы получили процедуру (10), которая позволяет последовательными приближениями находить значения неизвестного X_1 .

При $n = 0$ примем $X_1^{(0)} = 0$. Тогда уравнение (10) записывается так:

$$X_1^{(1)} \cdot G(l_1, l_1) = y_0(l_1) \cdot e[y_0(l_1)] .$$

Отсюда
$$X_1^{(1)} = y_0(l_1) \cdot e[y_0(l_1)] / G(l_1, l_1) . \quad (12)$$

Мы нашли (12) значение неизвестного X_l в первом приближении (на первом шаге интеграций). Второй шаг:

$$n = 1, \quad X_1^{(1)} = y_0(l_1) \cdot e[y_0(l_1)] / G(l_1, l_1) . \quad (13)$$

Подставляя параметры (13) в итерационное уравнение (10), получаем:

$$X_1^{(2)} \cdot G(l_1, l_1) = X_1^{(1)} \cdot G(l_1, l_1) + \\ + [y_0(l_1) - X_1^{(1)} \cdot G(l_1, l_1)] \cdot e[y_0(l_1) - X_1^{(1)} \cdot G(l_1, l_1)] . \quad (14)$$

Из найденного значения $X_1^{(1)}$ (формула 13) следует, что

$$y_0(l_1) - X_1^{(1)} \cdot G(l_1, l_1) = 0$$

при $y_0(l_1) \geq 0$.

С учетом этого уравнения (14) представим в виде

$$X_1^{(2)} \cdot G(l_1, l_1) = X_1^{(1)} \cdot G(l_1, l_1) + 0 \cdot e(0) = \\ = X_1^{(1)} \cdot G(l_1, l_1) + 0 \cdot 1 = X_1^{(1)} \cdot G(l_1, l_1) . \quad (15)$$

Отсюда $X_1^{(2)} = X_1^{(1)}$

При $y_0(l_1) < 0$ из уравнений (13) и (14) также следует равенство (15). Значения неизвестного X_l , найденные в первом и втором приближениях совпали (15). Дальнейшие приближения никаких поправок в значение X_l не привнесут. Поэтому окончательно принимаем $X_1 = X_1^{(1)}$. Если на втором (рассматриваемом) шаге вместо условия (15) мы получили бы неравенство $X_1^{(2)} \neq X_1^{(1)}$, то нам пришлось бы продолжить последовательные приближения, то есть пойти на третий шаг (приняв $n = 2$, $X_1^{(n)} = X_1^{(2)}$ подставлять эти значения в уравнение (10)). Для получения окончательной функции прогибов, подставим в выражения (15) или (16) (поскольку $n = 1$, $X^{(2)} = X^{(1)}$) в формулу (13):

$$y(x) = y_1(x) = y_0(x) - \frac{y_0(l_1) \cdot e[y_0(l_1)]}{G(l_1, l_1)} \cdot G(x, l_1) . \quad (16)$$

Сравните выражения (11) и (16). Итерационный процесс (10) сходится достаточно быстро и в случае сложных задач, когда балка содержит много односторонних связей. При решении таких задач число «шагов» интеграций находится обычно в пределах 3; 4.

Теперь рассмотрим балку (рис. 8а), содержащую включающе-выключающуюся связь.

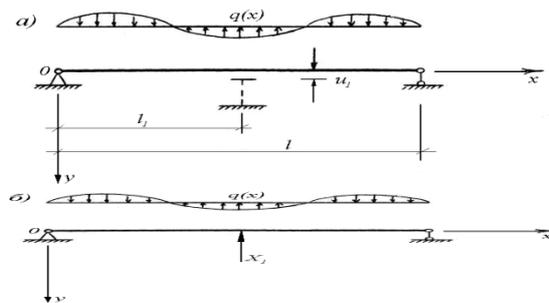


Рис. 8. Расчётные схемы балки
 Fig. 8. Calculation schemes of the beam

Средняя опора включается в работу, $y(l_1) \geq u_1$, где $y(l_1)$ – прогиб балки на опоре. При достижении опорной реакцией X_l некоторого предельного уровня R_l конструкция средней опоры разрушается, то есть связь выключается. Суммируя сказанное, условие совместности деформации (прогибов) на средней опоре можно записать так:

$$y(l_1) = y(l_1) - [y(l_1) - u_1] \cdot e[y(l_1) - u_1] \cdot [e(X_1) - e(X_1 - R_1)], \quad (17)$$

где $R_l \geq 0$, $u_l \geq 0$; e – единичная функция

Из условия (17) вытекают следующие ситуации:

1. $y(l_1) < u_1 \geq 0$;

$$y(l_1) = y(l_1) - [y(l_1) - u_1] \cdot 0 \cdot [e(X_1) - e(X_1 - R_1)] = y(l_1)$$

или $y(l_1) \equiv y(l_1)$ – тождество. (18)

При этом рис.8 а вырождается в рис. 9.

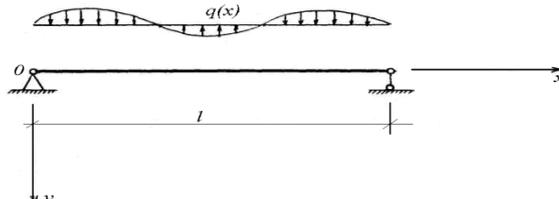


Рис. 9. Расчётная схема балки
 Fig. 9. Design diagram of the beam

2. $y(l_1) = u_1 \geq 0$. Здесь могут быть два случая. Первый случай:

а. Связь средней опоры еще не выключилась из работы $X_l < R_l$, то есть опорная реакция X_l не превысила предельного уровня R_l , при достижении которого средняя опора разрушается. Это значит в выражении (17) $e(X_1) - e(X_1 - R_1) = 1 - 0 = 1$. Тогда выражение (17) принимает вид

$$y(l_1) = y(l_1) - [y(l_1) - u_1] \cdot e[y(l_1) - u_1]$$

или

$$y(l_1) = y(l_1) - y(l_1) \cdot e[y(l_1) - u_1] + u_1 \cdot e[y(l_1) - u_1].$$

Поскольку $y(l_1) = u_1$,

$$\text{то } y(l_1) = y(l_1) - y(l_1) \cdot e(0) + u_1 \cdot e(0).$$

Отсюда

$$y(l_1) = y(l_1) - y(l_1) \cdot 1 + u_1 \cdot 1$$

или

$$y(l_1) = y(l_1) - y(l_1) + u_1.$$

Окончательно

$$y(l_1) = u_1. \quad (19)$$

При этом рис.8 а вырождается в рис.10.

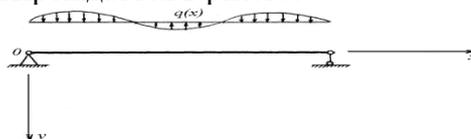


Рис. 10. Расчётная схема балки
 Fig. 10. Design diagram of the beam

Второй случай.

б. Связь средней опоры уже выключилась $X_l \geq R_l$ ($X_l \geq 0$, $R_l \geq 0$).

Тогда в выражении (17) единичная функция

$$e(X_1) - e(X_1 - R_1) = 1 - 1 = 0.$$

Теперь условие (17) записывается в виде тождества

$$y(l_1) \equiv y(l_1) \quad (20)$$

При этом рис. 8 преобразуется в рис.11.

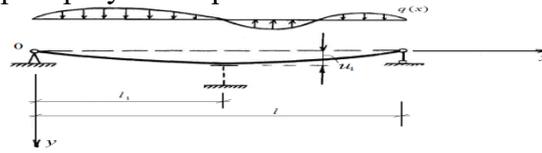


Рис. 11. Преобразованные расчётные схемы балки
Fig. 11. Transformed beam design schemes

Заметим: каждый раз, когда условие совместности деформаций (прогибов) возникает в тождество, в расчетной схеме «исчезает» соответствующая опора (связь), то есть $X_l = 0$. другими словами, балка деформируется беспрепятственно (сравните рис. 9 и 11, и тождества 18 и 20).

Таким образом, условие совместности деформаций (прогибов), записанное в виде выражения (17), учитывает все возможные изменения структуры балки: изгиб балки по схеме рис. 9, до включения в работу средней опоры (тождество 3.18); изгиб балки по схеме рисунка 10, после включения в работу средней опоры (уравнение 19);

В дальнейшем мы не будем так подробно пояснять работу односторонних связей и соответствующих им условий совместности деформаций типа (17). Как обычно, заменив среднюю опору ее реакцией X_l , получим основную систему (рис. 8б). Поскольку опоры балки в основной системе – шарнирные, то можем использовать функцию Грина $G(x, \xi)$ непосредственно без расширения области балки. Дифференциальное уравнение балки (рис. 8б) запишем в виде

$$EJ \cdot y^{IV}(x) = q(x) - X_1 \cdot \delta(x - l_1) \quad (21)$$

а его решение в интегральной форме :

$$y(x) = \int_0^l G(x, \xi) [q(\xi) - X_1 \cdot \delta(\xi - l_1)] d\xi \quad (22)$$

или
$$y(x) = y_0(x) - X_1 \cdot G(x, l_1) \quad (22)$$

где введено обозначение

$$y_0(x) = \int_0^l G(x, \xi) \cdot q(\xi) d\xi \quad (23)$$

Для нахождения неизвестной силы X_l воспользуемся условием совместности деформаций (прогибов) (17), которое запишем в итерационном режиме:

$$y_{n+1}(l_1) = y_n(l_1) - [y_n(l_1) - u_1] \times \times e \cdot [y_n(l_1) - u_1] \cdot [e(X_1^{(n)}) - e(X_1^{(n)} - R_1)] \quad (24)$$

$n = 0, 1, 2, 3 \dots$ – шаг итераций.

Из функции прогибов (22) найдем:

$$y_n(x) = y_0(x) - X_1^{(n)} \cdot G(x, l_1) \quad (25)$$

$$y_{n+1}(x) = y_0(x) - X_1^{(n+1)} \cdot G(x, l_1) \quad (26)$$

Подставляя выражения (25) и (26) в уравнение (24), получаем

$$\begin{aligned} y_0(l_1) - X_1^{(n+1)} \cdot G(l_1, l_1) &= y_0(l_1) - X_1^{(n)} \cdot G(l_1, l_1) - \\ &- [y_0(l_1) - X_1^{(n)} \cdot G(l_1, l_1) - u_1] \times \\ &\times e [y_0(l_1) - X_1^{(n)} \cdot G(l_1, l_1) - u_1] \times \\ &\times [e(X_1^{(n)}) - e(X_1^{(n)} - R_1)]. \end{aligned}$$

или

$$\begin{aligned}
 X_1^{(n+1)} \cdot G(l_1, l_1) &= X_1^{(n)} \cdot G(l_1, l_1) + \\
 &+ [y_0(l_1) - X_1^{(n)} \cdot G(l_1, l_1) - u_1] \times \\
 &\times e[y_0(l_1) - X_1^{(n)} \cdot G(l_1, l_1) - u_1] \times \\
 &\times [e(X_1^{(n)}) - e(X_1^{(n)} - R_1)].
 \end{aligned} \tag{27}$$

Здесь: $R_1 \geq 0$, $n = 0, 1, 2, 3, \dots$ – шаг последовательных приближений; значение функции $y(l_1)$ вычисляется с помощью интеграла (23)

$$y_0(l_1) = \int_0^{l_1} G(l_1, \xi) \cdot q(\xi) d\xi. \tag{28}$$

Далее принимая $n = 0$, $X_1^{(0)} = 0$, из итерационного уравнения (27) находим

$$X_1^1 \cdot G(l_1, l_1) = [y_0(l_1) - u_1] \cdot e[y_0(l_1) - u_1] \cdot [1 - 0]$$

$$\text{или } X_1^{(1)} \cdot \frac{1}{G(l_1, l_1)} \cdot [y_0(l_1) - u_1] \cdot e[y_0(l_1) - u_1]. \tag{28 a}$$

Переходим ко второму шагу. Принимая $n = 1$, $X_1^{(n)} = X_1^{(1)}$,

Из уравнения (27) находим

$$\begin{aligned}
 X_1^{(2)} \cdot G(l_1, l_1) &= X_1^{(1)} \cdot G(l_1, l_1) + [y_0(l_1) - X_1^{(1)} \cdot G(l_1, l_1) - u_1] \times \\
 &\times e[y_0(l_1) - X_1^{(1)} \cdot G(l_1, l_1) - u_1] \cdot [e(X_1^{(1)} - R_1)].
 \end{aligned} \tag{29}$$

Здесь могут быть различные ситуации. Первая ситуация: средняя опора еще не включилась, то есть $X_1 < R_1$ ($X_1 \leq 0$, $R_1 \geq 0$). Тогда уравнение (29) записывается в виде

$$\begin{aligned}
 X_1^{(2)} \cdot G(l_1, l_1) &= X_1^{(1)} \cdot G(l_1, l_1) + [y_0(l_1) - X_1^{(1)} \cdot G(l_1, l_1) - u_1] \times \\
 &\times e[y_0(l_1) - X_1^{(1)} \cdot G(l_1, l_1) - u_1].
 \end{aligned} \tag{30}$$

Если $y_0(l_1) \geq u_1$, то из выражений (28) и (30) следует:

$$X_1^{(2)} \cdot G(l_1, l_1) = X_1^{(1)} \cdot G(l_1, l_1)$$

$X_1^{(2)} = X_1^{(1)}$ – итерационный процесс сошелся при $n = 1$.

Если $y_0(l_1) < u_1 \geq 0$, то из выражений (28) и (30) следует, что $X_1^{(1)} = 0$,

$$X_1^{(2)} \cdot G(l_1, l_1) = X_1^{(1)} \cdot G(l_1, l_1),$$

$X_1^{(2)} = X_1^{(1)}$ – итерационный процесс сошелся при $n = 1$.

Итак, неизвестная реакция средней опоры X_l определяется так:

$$X_1 = X_1^{(1)} \text{ при } y_0(l_1) \geq u_1, X_1 < R_1, \tag{31}$$

$X_1 = 0$ при $y_0(l_1) < u_1, X_1 < R_1$,

где $u_1 \geq 0, R \geq 0$.

Вторая ситуация: Средняя опора уже выключилась, то есть $X_1 > R_1$ (здесь нужно иметь ввиду, что $R_1 \geq 0, X_1 \geq 0$). Для этого случая разность единичных функций, входящая в уравнение (29), равна нулю ($n = 1$):

$$e(X_1^{(1)}) - e(X_1^{(1)} - R_1) = 1 - 1 = 0. \tag{32}$$

Здесь учтено, что $X_1^{(1)} \geq 0, X_1^{(1)} \geq R_1 \geq 0$. С учетом равенства (32) уравнение (29) представим в виде $X_1^{(2)} \cdot G(l_1, l_1) = X_1^{(1)} \cdot G(l_1, l_1)$ или $X_1^{(2)} = X_1^{(1)}$ – итерационный процесс сошелся при $n = 1$. Чему же равно здесь $X_1^{(1)}$? Чтобы ответить на этот вопрос, необходимо принять $n = 0, X_1^{(0)} = 0$ и подставить эти

значения в уравнение (27). При $X_1^{(1)} \geq R_1$, где $X_1^{(1)}$ – определяется формулой (28), из уравнения (27) следует: $X_1^{(2)} = 0$. Суммируя все результаты, окончательно имеем

$$\begin{aligned} X_1 = X_1^{(1)} & \quad \text{при} & \quad \begin{cases} y_0(l_1) \geq u_1, \\ X_1^{(1)} < R_1; \end{cases} \\ X_1 = 0 & \quad \text{при} & \quad y_0(l_1) < u_1; \\ X_1 = 0 & \quad \text{при} & \quad \begin{cases} y_0(l_1) \geq u_1, \\ X_1^{(1)} > R_1. \end{cases} \end{aligned} \quad (33)$$

Здесь $X_1^{(1)}$ – определяется формулой (28). Теперь функцию прогибов получим из выражения (25) при $n = 1$:

$$y(x) = y_1(x) = y_0(x) - X_1^{(1)} \cdot G(x, l_1), \quad (34)$$

где $X_1^{(1)}$ находится соотношениями (33)

Рассмотренная балка (рис.8 а) содержит одну одностороннюю связь (среднюю опору). Для этой балки можно было бы найти решение и без алгоритмов, поскольку из рис. 8а видно, что балка может принять три ситуации (рис. 9, 10, 11). Для этих трех ситуаций нетрудно сразу записать очевидное решение в виде (33). К сожалению, предугадать возможные структурные изменения в балке (все возможные ситуации) удастся только, когда число односторонних связей равно единице. А как же быть, если балка имеет 2, 3, 4, 5 односторонних связей? Здесь вряд ли можно заранее предугадать все возможные ситуации, все структурные изменения в системе «балка-опоры». Нужен четкий алгоритм, который позволил бы на компьютере получить окончательное решение.

В двух предыдущих простейших задачах мы привели этот алгоритм, который, кстати, пригоден и в сложных системах. Далее мы обобщим изложенный выше алгоритм на общий случай, когда балка имеет « n » односторонних связей.

Обсуждение результатов. Для определения неизвестной реакции X односторонней связи, нам было необходимо располагать условиями совместности деформаций (прогибов) балки (12), (17). Далее мы приведем схемы односторонних связей и соответствующие условия совместности деформаций. Работу односторонней связи будем моделировать с помощью единичной функции. Общий случай односторонней связи показан на рис. 12

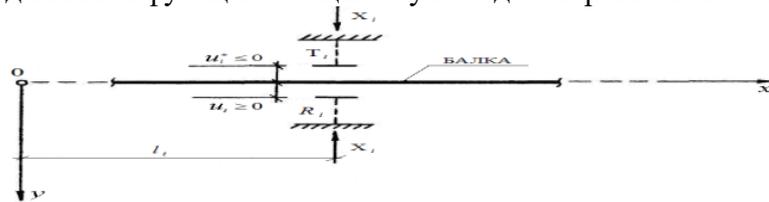


Рис. 12. Схема общего случая односторонней связи
 Fig. 12. Diagram of the general case of one-way communication

Здесь и далее (рис.12): пунктирные линии указывают на выключающиеся связи;

j – порядковый номер опоры в основной системе;

l_i – координата на оси « x » i -ой опоры в основной системе;

$u_i \geq 0$ – зазор между балкой и i -ой опорой при перемещениях балки вниз;

$u_i^* \leq 0$ – зазор между балкой и i -ой опорой при перемещении балки вверх;

R_i – предельное усилие (несущая способность связи), при котором разрушается конструкция нижней части опоры, нижняя связь опоры, (рис. 12),

T_i – предельное усилие, при котором разрушается конструкция верхней части опоры, верхняя связь i -ой опоры.

Параметры u_i , u_i^* , R_i , T_i будем называть характеристиками, причем характеристики R_i и T_i зависят от величины опорной реакции X_i (рис. 12), то есть

$$\left. \begin{aligned} R_i &= R_i(X_i) \\ T_i &= T_i(X_i) \end{aligned} \right\} \quad (35)$$

Для опоры, показанной на рис. 12, условие совместности деформаций (прогибов) можно записать в следующей виде:

$$y(l_i) = y(l_i) - h_i[X_i, y(l_i)] \quad (36)$$

Здесь функция:

$$\begin{aligned} h_i[X_i, y(l_i)] &= [y(l_i) - u_i] \cdot e[y(l_i) - u_i] \cdot [e(X_i) - e(X_i - R_i)] + \\ &+ [y(l_i) - u_i^*] \cdot e[-y(l_i) - u_i^*] \cdot [e(-X_i) - e(-X_i - T_i)]; \end{aligned} \quad (37)$$

e – единичная функция, свойства которой хорошо описаны в книге [5], $y(l_i)$ – значение прогибов $y(x)$ в точке $x = l_i$, где l_i – координата i -ой опоры в основной системе (рис. 12). Все остальные параметры, входящие в выражения (36) и (37) были пояснены выше. Меняя характеристики опоры R_i, T_i, u_i, u_i^* , из рис. 12 и условий совместности деформаций (36) и (37) можно получать различные ситуации. Далее мы приведем частные случаи, вытекающие из рис.12 и выражения (37).

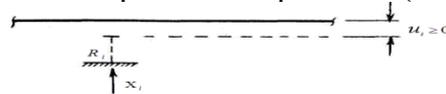


Рис. 13. Вариант схемы из рис. 12
 Fig. 13. Variant of the diagram from Fig. 12

При $u_i^* \rightarrow -\infty$ рис. 12 вырождается в рис. 13, а функция (37) принимает вид

$$\begin{aligned} h_i[X_i, y(l_i)] &= [y(l_i) - u_i] \cdot e[y(l_i) - u_i] \times \\ &\times [e(X_i) - e(X_i - R_i)]. \end{aligned} \quad (38)$$

Если $u_i \rightarrow \infty$, то рис. 12 переходит в рис. 14, а выражение (37) записывается так:

$$\begin{aligned} h_i[X_i, y(l_i)] &= [y(l_i) - u_i^*] \cdot e[-y(l_i) - u_i^*] \times \\ &\times [e(-X_i) - e(-X_i - T_i)]. \end{aligned} \quad (39)$$

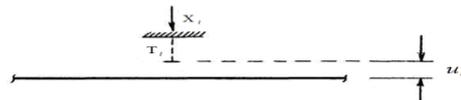


Рис. 14. Вариант схемы из рис. 12
 Fig. 14. Variant of the diagram from Fig. 12

Ниже приведены дифференциальные уравнения поперечного изгиба балки, а также алгоритм, пригодный для численного исследования на компьютере напряженно-деформированного состояния балки, показанной на рис. 15а.

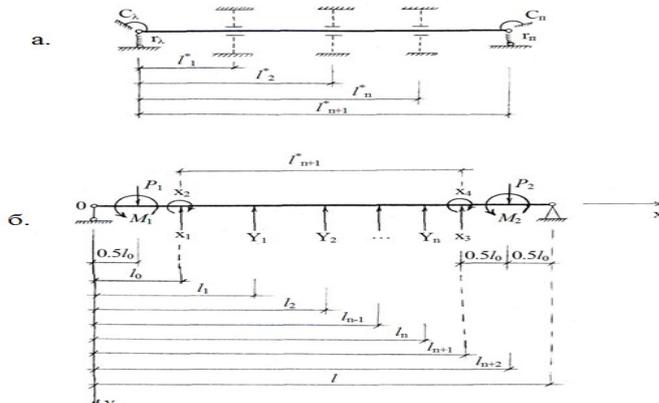


Рис. 15. Расчётные схемы многопролётной балки с односторонними связями
 Fig. 15. Calculation schemes of a multi-span beam with one-sided connections

Промежуточные опоры балки представляют собой включающее-выключающиеся связи, аналогичные показанной на рис. 12. Поэтому каждая промежуточная опора балки (рис. 15а) может принимать любое из частных состояний, которые были рассмотрены нами ранее. Число опор балки, не включая крайних, равно n ; $i = 1, 2 \dots n$. На рис. 15а $n = 3$. Балка имеет крайние опоры в виде упруго-податливых связей, характеризуемых коэффициентами жесткости r_l и C_l на левом и r_n и C_n – на правом концах балки.

С целью определения функции прогибов $y(x)$ балки введем, как обычно, основную систему (рис. 15б). Для этого расширим область балки слева и справа на величину

$$l_0 = \frac{1}{4} \cdot l_{n+1}^* \quad (l_{n+1}^* - \text{длина балки в заданной системе, рис. 15а});$$

отбросим все опоры и заменим их действие неизвестными, причем X_1, X_2, X_3, X_4 – реакции крайних опор, а Y_1, Y_2, \dots, Y_n – реакции промежуточных опор, аналогичных, показанному на рис. 12. Кроме этих введем силы P_1, P_2, M_1 и M_2 .

Если $q_0(x)$ – нагрузка в заданной системе (рис. 15а), то в основной системе (рис. 15б) $q(x) = q_0(x - l_0)$. На рис. 15б поперечная нагрузка $q(x)$, действующая на балку, (в основной системе) не показана.

Таким образом, на балку в основной системе (рис. 15б) действует $n + 8$ сосредоточенных сил и внешняя активно действующая нагрузка $q(x)$.

Дифференциальное уравнение балки (рис. 15б) запишем в виде [3, 4, 6]

$$\begin{aligned} EJ \cdot y^{IV}(x) = & q(x) + P_1 \cdot \delta(x + 0,5l_0) + M_1 \cdot \delta'(x + 0,5l_0) + \\ & + P_2 \cdot \delta(x - l_{n+2}) + M_2 \cdot \delta'(x - l_{n+2}) - \\ & - X_1 \cdot \delta(x - l_0) - X_2 \cdot \delta'(x - l_0) - \\ & - X_3 \cdot \delta(x - l_{n+1}) - X_4 \cdot \delta'(x - l_{n+1}) - \sum_{i=1}^n y_i \cdot \delta(x - l_i). \end{aligned} \quad (40)$$

Здесь: l_i – координаты сосредоточения опорных реакций в основной системе (рис. 15б);

$$\begin{aligned} l_0 = l_{n+1}^* / 4 \quad ; \quad l_1 = l_0 + l_1^* \quad ; \quad l_2 = l_0 + l_2^* \quad ; \\ l_n = l_0 + l_n^* \quad ; \quad l_{n+1} = l_0 + l_{n+1}^* \quad ; \quad l_{n+2} = l_{n+1} + 0,5l_0 \quad . \end{aligned}$$

Далее заметим: поскольку балка в основной системе (рис. 15б) обоими концами опирается шарнирно, то для рассматриваемой краевой задачи и для последующих задач нам будет необходима функция Грина $G(x, \xi)$. Функция Грина $G(x, \xi)$, которая была использована в этом примере, была нами дана в статье [9]

Вывод. В настоящей работе рассмотрены конструктивные схемы балок с односторонними связями, которые находят широкое применение в практике строительства.

Приведены дискретные опоры балок, обладающие свойством односторонних связей. При этом даются соответствующие схемы, а также аналитические выражения, описывающие особенности работы односторонних связей. Приводятся расчетные модели балок, которые лежат на опорах с односторонними связями. При этом даются соответствующие расчетные схемы и дифференциальные уравнения поперечного изгиба балок и плит на опорах с односторонними связями.

Разработаны алгоритмы решения дифференциальных уравнений, которые описывают работу балок с односторонними связями. Для иллюстрации алгоритма решения рассматриваются различные частные примеры.

Приведенные в работе расчетные модели балок с односторонними связями могут найти широкое применение при проектировании балочных конструкций, имеющих опоры с односторонними связями.

Библиографический список:

1. Айзенберг Я. М. Сооружения с выключающимися связями для сейсмических районов. Стройиздат. М. 1976 г.
2. Байков В.Н., Сигалов Э.Е. Железобетонные конструкции /общий курс/. Издательство «Стройиздат», Москва, 1991г. 970 стр.
3. Беляева Н.М. Соппротивление материалов. Издательство «Наука», Москва, 1976г., 607 стр.
4. Доннель Л.Г. Балки, пластины и оболочки. Издательство «Наука», Москва, 1982г., 567 стр.
5. Зельдович Я.Б. , Мышкис А.Д. Элементы прикладной математики. «Наука», М., 1965 г.
6. Кисилев В.А. Строительная механика и расчет сооружений. Стройиздат. М., 1986 г.
7. СП 16.13330.2017 «Стальные конструкции». Свод правил – Москва, строойиздат, 2017г. – 126 с.
8. СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия». Свод правил – Москва, строойиздат, 2016. – 95 с.,
9. Юсупов А.К., Муселемов Х.М., Устарханов Т.О. Оптимизация параметров шпренгельной балки. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки, Том 47, No4, 2020 г.С.119-131.

References:

1. Ayzenberg Ya.M. Structures with switching ties for seismic regions. Stroyizdat. Moscow, 1976 (In Russ)
2. Baikov V.N., Sigalov E. E. Reinforced concrete structures /general course/. Stroyizdat Publishing House, Moscow, 1991;970 (In Russ)
3. Belyaeva N.M. Strength of materials. Nauka Publishing House, Moscow, 1976;607. (In Russ)
4. Donnel L.G. Beams, plates and shells. Nauka Publishing House, Moscow, 1982;567. (In Russ)
5. Zeldovich Ya. B., Myshkis A.D. Elements of applied mathematics. Nauka, Moscow, 1965(In Russ)
6. Kiselev V.A. Structural mechanics and calculation of structures. Stroyizdat. M., 1986. (In Russ)
7. SP 16.13330.2017 "Steel structures". Code of practice - Moscow, Stroyizdat, 2017; 126. (In Russ)
8. SP 20.13330.2016 "Loads and impacts". Code of practice - Moscow, Stroyizdat, 2016; 95 (In Russ)
9. Yusupov A.K., Muselemov H.M., Ustarkhanov T.O. Optimization of truss beam parameters. *Herald of the Dagestan State Technical University. Technical Sciences.* 2020; 47(4):119-131. (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 Hydrotechnical Structures; hairulla213@mail.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 25.08.2024.

Одобрена после рецензирования/ Revised 15.09.2024.

Принята в печать/Accepted for publication 02.10. 2024.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

Верстка журнала осуществляется с электронных копий. Используется компьютерная обработка штриховых и полутоновых (в градациях серого) рисунков. Журнал изготавливается по технологии офсетной печати. В редакцию журнала необходимо представить: распечатку рукописи (1 экз.); распечатка должна представлять собой письменную копию файла статьи; электронную копию (допустима передача по электронной почте); метаданные авторов: ФИО, место работы, ученое звание, должность (1 экз.);

Правила оформления текста

Текст подготавливается в текстовом редакторе MicrosoftWord. Статья должна предусматривать разделы: «Введение», «Постановка задачи», «Методы исследования», «Обсуждение результатов», «Вывод». Объем непосредственно содержания статьи должен составлять не менее 9 -10 страниц машинописного текста. Формулы подготавливаются во встроенном редакторе формул MicrosoftWord или в редакторе MathType. Шрифтовое начертание обозначений в формулах, в таблицах и в основном тексте должно быть полностью идентичным. Ссылки на формулы и таблицы даются в круглых скобках, ссылки на использованные источники (литературу) - в квадратных скобках. Формат бумаги А4. Параметры страницы: поля - левое 3 см, верхнее и нижнее 2 см, правое 1,5 см; колонтитулы отсутствуют.

Элементы заглавия публикуемого материала

УДК; Перечень авторов (разделяется запятыми, инициалы после фамилий, на русском и английском языке); выравнивание по центру. Название статьи (на русском и английском языке). Резюме (Abstract) – 200-250 слов, характеризующих содержание статьи (на русском и английском языке). Ключевые слова (keywords) 5-10 слов или словосочетаний, отражающих содержание статьи (на русском и английском языке). Каждый элемент заглавия приводится, начиная с новой строки; выравнивание проводится по центру. **Основной текст** Шрифт TimesNewRoman 12 pt, выравнивание по ширине, первая строка с отступом 1,25 см, межстрочный интервал - 1.

Библиографический список

В статье указывается строка с текстом «**Библиографический список**». Библиографический список на русском языке выполняется по ГОСТ Р 7.0.5 -2008. Библиографический список должен составлять не менее 15 наименований источников литературы, среди которых от 30-70 % ссылок на иностранные источники. Ссылки на неопубликованные работы не допускаются. Обязательно цитирование современных работ, изданных по тематике статьи за последние 5 лет. Доля ссылок на статьи авторов рукописи, изданных ранее, не должна превышать 20% от общего количества ссылок. Библиографический список обязательно должен быть переведен на английский язык. «References» должен быть составлен по стандарту «Ванкувер». Ссылки на материалы, размещенные на электронных носителях, следует допускать в крайнем случае. Редакция оставляет за собой право потребовать от автора замены ссылки, если на момент обработки статьи по указанному адресу материал будет отсутствовать.

Справка об авторах

Включает для каждого автора фамилию, имя, отчество (полностью), ученую или академическую степень, ученое звание, ORCID, название и полный адрес места работы. Обязательно указывается адрес электронной почты. Сведения представляются на русском и английском языках.

Верстка формул

Формулы подготавливаются во встроенном редакторе формул MicrosoftWord или в редакторе MathType; нумеруются только те формулы, на которые есть ссылки в тексте статьи; использование при нумерации букв и других символов не допускается. Выписанные в отдельную строку формулы выравниваются по середине строки, номер заключается в круглые скобки и выравнивается по правому краю текста. Все впервые встречающиеся в формуле обозначения должны быть расшифрованы сразу после формулы.

Верстка рисунков

Рисунки, представляющие собой графики, схемы и т. п., должны быть выполнены в графических векторных редакторах (встроенный редактор MicrosoftWord, CorelDraw, MicrosoftVisio и т. п.). Использование точечных форматов (.bmp, .jpeg, .tif, .html) допустимо только для рисунков, представление которых в векторных форматах невозможно (фотографии, копии экрана монитора и т. п.). Название рисунка указывается на русском и английском языках.

Верстка таблиц

Таблица состоит из следующих элементов: нумерационного заголовка (слова «Таблица» и ее номера арабскими цифрами); шапки (заголовочной части), включающей заголовки графа (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 рецензии являются признанными специалистами по тематике рецензируемых материалов. Рецензии хранятся в редакции издания в течение 5 лет. При поступлении соответствующего запроса редакция вправе направлять копии рецензий в Министерство науки и высшего образования РФ.

План-график издания журнала

Выпуск 1 (март) – прием статей до 31 декабря предыдущего года; Выпуск 2 (июнь) – прием статей до 31 марта текущего года; Выпуск 3 (сентябрь) – прием статей до 30 июня текущего года; Выпуск 4 (декабрь) – прием статей до 30 сентября текущего года. Редакция оставляет за собой право производить редакционные изменения, не искажающие основное содержание статьи. Статьи, не отвечающие правилам оформления, к рассмотрению не принимаются. Рукописи и электронные носители авторам не возвращаются. Датой поступления считается день получения редакцией окончательного текста статьи. Адрес редакционного совета: 367015, РД, г. Махачкала, пр. И. Шамиля, 70, ФГБОУ ВО «ДГТУ», Учебно-лекционный корпус 2, редакция журнала «Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки». Технические вопросы можно выяснить по электронной адресу: aidaesetova@rambler.ru и по телефону 8(8722)62-39-64, +79280504268

FORMATTING REQUIREMENTS FOR PAPERS

Electronic copies are used when laying out the journal. Computer processing is used for line and halftone (grayscale) graphics. The journal is produced by offset printing technology. Therefore, the following should be submitted to the editor: a printout of the manuscript (2 copies); the printout should be a hard copy of the electronic article file; electronic copy (e-mail is acceptable); an expert opinion supporting the article's suitability for publication (1 copy); Information about authors: Name, place of work, academic rank, position.

Guidance for the preparation of texts

The text should be prepared in Microsoft Word. The article must include sections entitled: "Introduction", "Background", "Methods", "Results and Discussion", "Conclusion". The article itself is supposed to comprise at least 9-10 if typewritten pages. Formulae should be prepared in Microsoft Word's built-in equation editor or MathType. Font symbols used in formulae, tables and in the main text must be completely identical. References to formulae and tables are given in round brackets; references to the sources referred to (literature) – in square brackets. Paper size – A4. Page setup: margins – left 3 cm, top and bottom – 2 cm, right – 1.5 cm; no headers or footers. **Elements of the title of the published material** UDC / LBC; List of authors (separated by commas; initials after surnames; in Russian and English); alignment *right*. Title of the article (in Russian and English). Abstract – 200-250 words or characters describing the content of the article (in Russian and English). Keywords – 5-10 words or phrases that reflect the content of the article (in Russian and English). Each title element should start on a new line; aligned centre. **Body text.** Font TimesNewRoman 12 pt, full justification, first line with 1.25 cm indentation, line spacing – 1.

Bibliography

The bibliography list should be entitled References. References in Russian prepared according to GOST R 7.0.5 -2008.

The reference list is considered to include at least 20 names of literature sources, including 30–70% of references to foreign sources. References to unpublished works are not permitted. Only recent works on the subject of the article published within the past 5 years should be cited. The proportion of references to articles previously published by the authors should not exceed 20% of the total number of references. The bibliography must be translated into English. "References" should be drawn up according to the "Vancouver" standard. Please indicate your chosen standard when formulating the bibliography. Links to material on electronic media shall be allowed as a last resort. The editors reserve the right to require a replacement reference from the author if an item is absent at a specified address at the time of processing of the article.

Information about authors

For each author, the following information should be provided: first name, middle name (or patronymic) and last name, scientific or academic degree, academic title, brief academic biography (no more than 5-6 lines), name and full address of place of work. The specification of an email address is mandatory.

Composition of formulas

Formulas should be prepared in the built MicrosoftWord equation editor or MathType Editor; only those formulas that are referenced in the text should be numbered; the use of letters or other characters is not permitted when enumerating equations. Formulas written out on a separate line are aligned to the middle of the line; their respective numbers shall be in parentheses and right-aligned. All symbols occurring in the formula for the first time must be decoded immediately after the formula.

Layout of figures

Drawings, consisting of graphs, charts, etc. should be prepared in graphic vector editors (the internal editor of MicrosoftWord, CorelDraw, MicrosoftVisio etc.). The use of bitmap formats (.bmp, .jpeg, .tif) is only permissible for graphics whose presentation is not possible in vector formats (photos, screenshots, etc.).

Layout of tables

A table should consist of the following elements: numerical title (the word "Table" and its number in Arabic numerals); title (header section) including column headings (explaining the meaning of the data in the columns); side heading (the first column on the left) and the table body (the other columns of the table).

Reviewing requirements for and saving of scientific article reviews, received by the journal editorial staff

A scientific article received by the editorial office is considered by the responsible editor in terms of its compliance with topics and directions of the magazine, formatting guidelines and availability of supporting documents. The editorial staff carries out a review of all incoming materials to the editor with a view to peer review. All reviewers are acknowledged experts on the topic of the peer-reviewed material. Reviews are stored at the editorial office for 5 years. On receipt of a proper request, editorial staff have the right to submit copies of reviews to the RF Ministry of Education and Science.

Publication schedule

Issue 1 (March) – articles accepted until 31 December of the previous year; Issue 2 (June) – articles accepted until March 31 of the present year; Issue 3 (September) – articles accepted until 30 June of the present year; Issue 4 (December) – articles accepted until September 30 of the present year; The Editorial Board reserves the right to make editorial changes which do not distort the main content of the article. Articles that do not conform to formatting guidelines will not be taken into consideration. Manuscripts and electronic media will not be returned. The date of acceptance shall be deemed to be the date of receipt of the final text by the editorial board. Address of the editorial board: 70 Imama Shamiya Ave., Makhachkala 367026, Daghestan, Russia. Daghestan State Technical University, Tutorial-Lecture Building 2, Editorial Board «Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences». Technical questions can be clarified by e-mail: aidaesetova@rambler.ru 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 51– №4 – 2024.

**HERALD
OF DAGHESTAN STATE TECHNICAL UNIVERSITY. TECHNICAL SCIENCES**
Makhachkala, Volume 51, No.4. 2024.

**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 30.12.2024г. Сдано в печать 30.12.2024г.
Формат 60x84 ¹/₈. Гарнитура «Times». Бумага офсетная
Тираж 500. Усл. п.л. 29.06 Уч. изд.л. 21.23
Заказ № 201224

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