

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, № 3, 2024.

ВЕСТНИК

ДАГЕСТАНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА.

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Volume 51, No.3, 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, № 3, 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 WBH, г. Берлин, Германия.

Кузузов В.И., 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.

Кузузов 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, № 3
Махачкала, 2024. 240с.

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

Адрес учредителя и издателя
367026, 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
М.А. Воронцов, В.Ю. Глазунов, А.С. Грачев, М.С. Машталир, С.А. Поспелов, А.В. Чернышев. Сравнение способов моделирования газодинамических характеристик высоконапорных центробежных компрессоров, обеспечивающих работу промышленных установок низкотемпературной сепарации, на примере модификации с отношением давлений до 1,9...2,1.....	6
О.В. Евдулов, Д.В. Евдулов, И.А. Габитов, М.У. Яхьяев. Термоэлектрическая установка для подъема объектов из неглубоких водоемов методом намораживания.....	15
Ф.Х. Кудаева. Математическая модель построения матрицы коэффициентов теплопроводности при низкотемпературном воздействии на многослойный эпидермис биологической ткани.....	25
Е.И. Страшко, И.А. Шорсткий, Р.А. Жлобо. Методика охлаждения серверных помещений.....	35
Информационные технологии и телекоммуникации.....	42
Е.В. Бурькова, А.А. Рычкова, Л.А. Гриценко. Категорирование объектов критической информационной инфраструктуры учреждения высшего образования.....	42
Ш.М. Джафарова, С.М. Ахмедова, А.Г. Алиева. Исследование методов моделирования предприятия массового обслуживания.....	54
В.А. Егунов, В.А. Шабаловский. Технологии кеширования данных в современных микропроцессорах.....	60
А.С. Кечеджиев, О.Л. Цветкова, А.И. Дубровина. Методика выявления аномалий в данных оценки кибератак с использованием Random Forest и градиентного бустинга в машинном обучении.....	72
А.М. Конаков, И.И. Лившиц. Поиск оптимального пути построения системы защиты информации на основе марковских цепей.....	86
А.И. Магомедов, И.А. Магомедов, М.Ш. Усманов. Структурная организация нечёткой системы контроля состояния оборудования и управления газораспределительной станцией.....	93
Н.А. Мальцева, А.А. Полозов, Н.В. Папуловская, С.Л. Гольдштейн. Качество методов трекинга с реидентификацией объектов.....	103
Н.Ф. Махмутова, Э.В. Бирих, Д.В. Сахаров, А.С. Кривец, М.А. Дегтярев. Исследование способов повышения безопасности корпоративных сетей.....	110
С.И. Носков, Ю.А. Бычков. Совместное применение методов максимальной согласованности и антиробастного оценивания параметров при построении регрессионных моделей.....	117
А.Д. Попов. Веб-сервис с моделью машинного обучения для мониторинга воздушного пространства.....	123
Н.Н. Романова, В.В. Грызунов. Исследование методом расширенного систематического обзора литературы E-SLR проблемы обеспечения безопасности персональных данных при использовании OSINT.....	130
А.Ф. Сальников, К.В. Иванова, Н.И. Меркулова. Компаративный анализ основных методов фильтрации кадров для повышения спектрального разрешения видеопотока.....	145
Е.А. Трушников. Обнаружение фишинговых порталов посредством алгоритмов машинного обучения.....	154
А.И. Янгиров, И.М. Янгиров, Е.А. Рогозин, С.Б. Ахлостин. Методический подход к количественной оценке защищенности открытых операционных систем АС ОВД.....	163
Строительство и архитектура.....	172
Д.В. Абрамкина, А.О. Иванова, Д.Ф. Карпов, М.В. Павлов, Х.М. Вафаева. Сравнительный анализ методик акустического расчета дросселирующих устройств.....	172
Х.Р. Зайнулабидова. Оптимизация параметров сейсмоизоляции каркасных зданий с применением адаптивных методов.....	180
Е.И. Крупнов, И.А. Зайцева, С.А. Логинова, А.В. Симагин. Внедрение энергосберегающих технологий в домостроении.....	189
А.А. Крутилин, Ф.П. Потапов, Н.А. Инькова, О.К. Пахомова. Влияние средневзвешенного диаметра шара на размер частиц конечного продукта.....	195
Х.П. Культербаев, М.М. Пайзулаев, Ш.А. Омаров. Свободные колебания континуально-дискретной многопролётной балки с учетом инерционных сил вращения.....	202
А.К. Юсупов, Х.М. Муселемов, Р.И. Вишталов. Оптимизация стропильных и рамных конструкций.....	215
Б.М. Языев, Сун Сюаньчжэнь, М.А. Магомедов, С.В. Литвинов, В.В. Кузнецов. Моделирование ползучести деревянной балки прямоугольного сечения при длительной статической нагрузке.....	227
Требования к оформлению статей.....	237

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 . 3 , 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; Ganapi J. Akhmedov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; Alexander P. Ivanov, Dr. Sci. (Mathematics and Physics), Moscow Institute of Physics and Technology (State University), Dolgoprudny, Russia; Nicholay I. Kargin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Vice Rector, Deputy Director of the Institute for Functional Nuclear Electronics, National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia; Dmitry N. Kobzareenko, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences Institute of Geothermal Problems, Daghestan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Makhachkala, Russia; Alexander A. Krugljakov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, General Director Wissenschaftliche Beratung und Handelsvertretung, Vladimir M. Kutuzov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, President St. Petersburg Electrotechnical University «LETI», Saint-Petersburg, Russia; Magomed Kh. Magomedov, Dr. Sci. (Mathematics and Physics), General Director, "SAUNO" Ltd. Moscow, Russia; Gadzhimet K. Safaraliyev, Dr. Sci. (Mathematics and Physics), Professor, Scientific Director of the «Microelectronics and Nanotechnology» Research Institute, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; Alexander B. Sulin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Corresponding member, MAX, Institute of Industrial and Marine Medicine of Federal Medical and Biological Agency, St. Petersburg, Russia;</p> <p>Scientific rubric «Information Technology and Telecommunications»</p> <p>Executive editor: Vladimir B. Melekhin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; Mahir M. Bashirov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Azerbaijan Technical University, Baku, Azerbaijan; Arkady N. Larionov, Dr. Sci. (Economics), Professor, General Director LLC Research Center «Strategy», Moscow, Russia Igor E.Lobanov, Dr. Sci. (Eng.), Leading Researcher, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia; Mher V. Markosyan, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Director of Yerevan Research Institute of Communication Facilities, Yerevan, Republic of Armenia; Aslan G. Mustafayev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; Eugene A. Rogozin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Voronezh Institute of the Ministry of the Interior of Russia, Voronezh, Russia; Tazhudin E. Sarkarov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; Boris I. Shakhtarin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia Valery I. Finayev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department, Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia; Vyacheslav M. Khachumov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of laboratory, Institute for Systems Analysis of RAS, Moscow, Russia; Alexey G. Yakunin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department, Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia.</p> <p>Scientific rubric «Building and architecture» Executive editor: Gadzhimurad N.Khadzhishalapov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; Vladimir I. Andreev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russia; Alexey N. Davidyuk, Dr. Sci. (Eng.), Honored Builder of Russia, Director, Gvozdev NII ZHB, JSC «SIC Construction», Moscow, Russia; Vladimir G. Kazachek, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Senior researcher, Ataev Institute of Dwelling - NIPTIS Director of Mobile diagnostics in construction, Minsk, Republic of Belarus; Khasan N. Mazhiev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Millionshchikov Grozny State Oil Technical University, Grozny, Russia; Gregory V. Nesvetaev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of Construction Technologies Department, Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia; Batyr M. Yazyev, Dr. Sci. (Eng.), Advisor to RAASN, Professor of Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia.</p> <p>Editorial council</p> <p>Chairman of the editorial council: Boris A.Yakimovich, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia.</p> <p>The co-chairs of the editorial council: Konstantin M. Ivanov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Rector, Ustinov Baltic State Technical University «VOENMECH», Saint-Petersburg, Russia; Vladimir M. Kutuzov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, President St. Petersburg Electrotechnical University «LETI», Saint-Petersburg, Russia;</p> <p>Members of the Editorial Board: Mustafa B.-O. Babanly, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Rector, Azerbaijan State University of Oil and Industry, Baku, Azerbaijan; Islam I. Djanzakov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Corresponding member, SRA RK, Academician of MANEB, Atyrau, Republic of Kazakhstan; Sergey I. Timoshin, Dr. Sci. (Mathematics and Physics), Academician of the Belarusian Academy of Engineering, Professor, Rector, Sukhoi Gomel State Technical University, Gomel, Republic of Belarus;</p>	<p>Research areas</p> <p>2.4.8. Machines and devices, processes of refrigeration and cryogenic equipment (Technical Sciences), 2.3.1. System analysis, management and information processing (Technical Sciences), 2.3.3. Automation and management of technological processes and production (Technical Sciences), 2.3.4. Management in organizational systems (Technical Sciences), 1.2.2. Mathematical modeling, numerical methods and program complexes (Technical Sciences), 2.3.6. Methods and systems for information security, information security(Technical Sciences), 2.3.7.Computer modeling and design automation (Technical sciences) 2.1.3.Heat supply, ventilation, air conditioning, gas supply and lighting (Technical Sciences), 2.1.5. Building materials and products (Technical Sciences), 2.1.9.Construction mechanics (Technical Sciences),</p> <p>Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences.Vol. 51, No.3</p> <p>Makhachkala, 2024-240p.</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 367026, Russia. Daghestan State Technical University Tel./fax (8722)623715 (8722)623964</p>
---	--

CONTENTS

Energy and Electrical Engineering	6
M.A. Vorontsov, V.Yu. Glazunov, A.S. Grachev, M.S. Mashtalir, S.A. Pospelov, A.V. Chernyshev. Comparison of methods for modeling the gas-dynamic characteristics of high-pressure centrifugal compressors that ensure the operation of field low-temperature separation units, using the example of a modification with a pressure ratio of up to 1.9...2.1.....	6
O.V. Evdulov, D.V. Evdulov, I.A. Gabitov, M.U. Yakhyaev. Thermoelectric installation for lifting objects from shallow reservoirs using the freezing method.....	15
F.Kh. Kudayeva. Mathematical model for constructing a matrix of coefficients thermal conductivity under low-temperature influence on the multilayer epidermis of biological tissue.....	25
E.I. Strashko, I.A. Shortsky, R.A. Zhlobo. Method of cooling server rooms.....	35
Information Technology and Telecommunications	42
E.V. Burkova, A.A. Rychkova, L.A. Gritsenko. Categorization of objects of critical information infrastructure of higher education institutions.....	42
Sh.M. Jafarova, S.M. Akhmedova, A.G. Aliyeva. Research of methods of modeling of mass service enterprise.....	54
V.A. Egunov, V.A. Shabalovsky. Data caching technologies in modern microprocessors.....	60
A.S. Kechedzhiev, O.L. Tsvetkova, A.I. Dubrovina. Methodology for detecting anomalies in cyber attack assessment data using Random Forest and Gradient Boosting in machine learning.....	72
A.M. Konakov, I.I. Livshits. Finding the optimal way to build an information security system based on Markov chains.....	86
A.I. Magomedov, I.A. Magomedov, M.S. Usmanov. The structural organization of a fuzzy system for monitoring the condition of equipment and control of a gas distribution station.....	93
N.A. Maltseva, A.A. Polozov, N.V. Papulovskaya, S.L. Goldstein. Quality of tracking methods with object reidentification.....	103
N.F. Makhmutova, E.V. Birikh, D.V. Sakharov, A.S. Krivets, M.A. Degtyarev. Research of ways to improve the security of corporate networks.....	110
S.I. Noskov, Yu.A. Bychkov. Combined application of methods of maximum consistency and anti-robust parameter estimation in the construction of regression models.....	117
A.D. Popov. Web service with machine learning model for airspace monitoring.....	123
N.N. Romanova, V.V. Gryzunov. Research by the method of an extended systematical literature review E-SLR the problem of ensuring the security of personal data when using OSINT.....	130
A.F. Salnikov, K.V. Ivanova, N.I. Merkulova. Comparative analysis of the main frame filtering methods to increase the spectral resolution of the video stream.....	145
E.A. Trushnikov. Detection of phishing portals through machine learning algorithms.....	154
A.I. Yangirov, I.M. Yangirov, E.A. Rogozin, S.B. Akhlyustin. Methodological approach to quantitative assessment of the security of open operating systems AS of the Internal Affairs Bodies.....	163
Building and Architecture	172
D.V. Abramkina, A.O. Ivanova, D.F. Karpov, M.V. Pavlov, Kh.M. Vafaeva. Comparative analysis of acoustic calculation methods for throttling devices.....	172
H.R. Zainulabidova. Optimization of seismic insulation parameters of frame buildings using adaptive methods...	180
E.I. Krupnov, I.A. Zaitseva, S.A. Loginova, A.V. Simagin. Implementation of Energy-saving Technologies in House construction.....	189
A.A. Krutilin, F.P. Potapov, N.A. Inkova, O.K. Pakhomova. The influence of the weighted average diameter of the ball on the particle size of the final product.....	195
H.P. Kulterbaev, M.M. Paizulaev, Sh.A. Omarov. Free vibrations of a Continuous-discrete multi-span Beam taking into account inertial Rotation Forces.....	202
A.K. Yusupov, Kh.M. Muselemov, R.I. Vishtalov. Optimization of Rafter and Frame structures.....	215
B.M. Yazyev, Xuanzhen Song, M.A. Magomedov, S.V. Litvinov, V.V. Kuznetsov. Simulation of creep of a rectangular wooden beam under prolonged static load.....	227
Formatting requirements for papers	237



УДК 621.515

DOI: 10.21822/2073-6185-2024-51-3-6-14

Оригинальная статья /Original article

Сравнение способов моделирования газодинамических характеристик высоконапорных центробежных компрессоров, обеспечивающих работу промышленных установок низкотемпературной сепарации, на примере модификации с отношением давлений до 1,9...2,1

**М.А. Воронцов¹⁻³, В.Ю. Глазунов⁴, А.С. Грачев^{1,3},
М.С. Машталир⁵, С.А. Поспелов⁵, А.В. Чернышев²**

¹ ООО «Газпром ВНИИГАЗ»,

¹195112, г. Санкт-Петербург, пр. Малоохтинский, д.45, литера А, 2-Н, офис 812, Россия,

² Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,

²105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, с. 1, Россия,

³ Национальный исследовательский университет ИТМО,

³197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49, Россия,

⁴ ООО «Газпром добыча Надым»,

⁴629736, г. Надым, ул. Пионерская, стр. 14, Россия,

⁵ ООО «Газпром трансгаз Санкт-Петербург»,

⁵196128, г. Санкт-Петербург, ул. Варшавская, д. 3, к. 2, литера Б, Россия

Резюме. Цель. В настоящее время для разработки Валанжинских и других глубоководных (по сравнению с Сенманом) залежей применяются установки низкотемпературной сепарации (НТС) с турбодетандерными агрегатами (ТДА). Дожимная компрессорная станция (ДКС) является одним из ключевых технологических объектов, необходимых для обеспечения эффективной работы перспективных технологий подготовки газа по способу НТС с ТДА к транспорту. Целью исследования является обоснование оптимальных режимов работы, а также разработка мероприятий по технологическому развитию дожимной компрессорной станции на основе применения методов моделирования работы центробежных компрессоров, газоперекачивающих агрегатов и, непосредственно, дожимной компрессорной станции. **Метод.** В ходе исследования применялись: метод приведенных характеристик, уточненный метод приведенных характеристик, метод двухмерной аппроксимации. Основу математической модели объектов исследования, применяемой в расчетах технологических режимов работы, составляет газодинамическая характеристика (ГДХ) центробежных компрессоров. **Результат.** Представлены результаты сравнения трех способов моделирования ГДХ (метод приведенных характеристик, уточненный метод приведенных характеристик, метод двухпараметрической аппроксимации) высоконапорных ЦБК на примере ЦБК с отношением давлений до 1,9...2,1, предназначенного для оснащения ГПА единичной мощностью 16,0 МВт в составе промышленных ДКС. Проведен анализ и сопоставление полученных результатов моделирования с фактическими данными. **Вывод.** Точность математической модели ГДХ ЦБК в составе промышленных ДКС, обеспечивающих работу установок НТС с ТДА, определяет точность оценки энергопотребления и технического состояния ГПА, а также расчетов перспективных режимов работы газоперекачивающего оборудования, которые выполняются с целью решения ряда прикладных задач, включая определение сроков модернизации оборудования или реконструкции станции.

Ключевые слова: компрессорная станция, газоперекачивающие агрегаты, центробежные компрессоры, высоконапорные центробежные компрессоры, математическое моделирование центробежных компрессоров, метод приведенных характеристик, уточненный метод приведенных характеристик, установки низкотемпературной сепарации

Для цитирования: М.А. Воронцов, В.Ю. Глазунов, А.С. Грачев, М.С. Машталир, С.А. Пospelov, А.В. Чернышев. Сравнение способов моделирования газодинамических характеристик высоконапорных центробежных компрессоров, обеспечивающих работу промышленных установок низкотемпературной сепарации, на примере модификации с отношением давлений до 1,9...2,1. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2024; 51(3):6-14. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-3-6-14

Comparison of methods for modeling the gas-dynamic characteristics of high-pressure centrifugal compressors that ensure the operation of field low-temperature separation units using the example of a modification with a pressure ratio of up to 1.9...2.1

М.А. Vorontsov¹⁻³, V.Yu. Glazunov⁴, A.S. Grachev^{1,3}, M.S. Mashtalir⁵, S.A. Pospelov⁵, A.V. Chernyshev²

¹ Gazprom VNIIGAZ LLC,

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

² N.E. Bauman Moscow State Technical University,

² 2nd Baumanskaya St. 5, p.1, Moscow 105005, Russia,

³ National Research University ITMO,

³ 49 Kronverksky Ave., St. Petersburg 197101, Russia,

⁴ Gazprom Dobycha Nadym LLC,

⁴ Pionerskaya St., build. 14, Nadym 629736, Russia,

⁵ LLC Gazprom Transgaz St. Petersburg,

⁵ 3 Varshavskaya St., build.2, letter B, St. Petersburg 196128, Russia

Abstract. Objective. Currently, for the development of Valanginian and other deeplying (compared to the Cenomanian) deposits, low-temperature separation (LTS) units with turboexpander units (TDA) are used, and the booster compressor station (BCS) is one of the key technological facilities necessary to ensure the efficient operation of promising technologies for gas preparation using the NTS method with TDA turboexpander units for transport. The purpose of the study is to substantiate optimal operating modes, as well as to develop measures for the technological development of a booster compressor station based on the use of methods for modeling the operation of centrifugal compressors, gas pumping units and, directly, the booster compressor station. **Method.** The following methods were used: the method of reduced characteristics, the refined method of reduced characteristics, and the two-dimensional approximation method. The basis of the mathematical model of the research objects is the gas-dynamic characteristics of centrifugal compressors. **Result.** The results of a comparison of methods for modeling HDC (reduced characteristics method, refined method of reduced characteristics, two-parameter approximation method) of high-pressure pulp and paper mills are presented using the example of a pulp and paper mill with a pressure ratio of up to 1.9...2.1, intended for equipping gas compressor units with a unit power of 16.0 MW as part of field operations. DKS. An analysis and comparison of the obtained modeling results with actual data was carried out. **Conclusion.** The accuracy of the mathematical model of the GDC PPM as part of the field booster compressor stations that ensure the operation of NTS installations with TDA determines the accuracy of the assessment of energy consumption and the technical condition of the gas pumping units, as well as calculations of future operating modes of gas pumping equipment, which are carried out to solve a number of applied problems, including determining the timing of equipment modernization or reconstruction of the station.

Keywords: compressor station, gas compressor units, centrifugal compressors, high-pressure centrifugal compressors, mathematical modelling of centrifugal compressors, reduced characteristic method, refined reduced characteristic method, low-temperature separation units

For citation: M.A. Vorontsov, V.Yu. Glazunov, A.S. Grachev, M.S. Mashtalir, S.A. Pospelov, A.V. Chernyshev. Comparison of methods for modeling the gas-dynamic characteristics of high-pressure centrifugal compressors that ensure the operation of field

low-temperature separation units, using the example of a modification with a pressure ratio of up to 1.9...2.1. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2024; 51(3):6-14. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-3-6-14

Введение. По мере снижения пластовых давлений в составе промышленных технологических систем требуется введение и поэтапное технологическое развитие дожимной компрессорной станции (далее – ДКС). Ввод ДКС требуется для устранения «дефицита» рабочего давления и соответствующего обеспечения штатной работы установок подготовки газа, а также обеспечения давления, необходимого для передачи газа потребителям [1-6].

В настоящее время для разработки Валанжинских и других глубокозалегающих (по сравнению с Сеноманом) залежей применяются установки низкотемпературной сепарации (далее – НТС) с турбодетандерными агрегатами (далее – ТДА), и ДКС является одним из ключевых технологических объектов, необходимых для обеспечения эффективной работы перспективных подготовки газа по способу НТС с ТДА к транспорту [7]. Кроме того, ДКС является основным потребителем топливного газа, что определяет повышенное внимание к повышению энергетической эффективности ее работы [3, 4, 6, 8].

Для обоснования оптимальных режимов работы, а также мероприятий по технологическому развитию ДКС (замена сменных проточных частей, ввод ГПА, их переобвязка для последовательной работы и т.п.) широко используют методы математического моделирования работы ДКС [8–12]. Основу математической модели (далее – ММ) ДКС, применяемой в расчетах технологических режимов работы, составляет газодинамическая характеристика (далее – ГДХ) центробежных компрессоров (далее – ЦБК) [10, 11].

Постановка задачи. Известны различные подходы к составлению ММ ЦБК [10–13]: методы, основанные на моделировании потока в проточной части ЦБК [12], методы, основанные на моделировании ГДХ ЦБК [10, 11, 13].

Известны различные методы, основанные на моделировании ГДХ. Также известно, что они обеспечивают различную степень точности результатов при создании ММ высоконапорных модификаций ЦБК с отношением давлений более 1,5 и количеством ступеней сжатия более трех [10, 11].

В связи с этим, а также увеличением потребности в высоконапорных ЦБК природного газа в различных сегментах газовой промышленности [10], исследования, направленные на уточнение существующих способов моделирования ГДХ высоконапорных ЦБК, являются актуальными.

Одним из этапов уточнения ММ является накопление данных о результатах и точности моделирования с использованием различных методов [10].

В данной работе представлены результаты сравнения трех способов моделирования ГДХ (метод приведенных характеристик, уточненный метод приведенных характеристик, метод двухпараметрической аппроксимации) высоконапорных ЦБК на примере ЦБК с отношением давлений до 1,9...2,1, проточная часть которого состоит из четырех ступеней сжатия, предназначенного для оснащения ГПА единичной мощностью 16,0 МВт в составе промышленных ДКС. Проведен анализ и сопоставление полученных результатов моделирования с фактическими данными.

Методы исследования. Моделирование ГДХ высоконапорного ЦБК рассматривалось с применением:

- метода приведенных характеристик (далее – МПХ) [13],
- уточненного метода приведенных характеристик (далее – УМПХ) [10, 11],
- метода двухмерной аппроксимации (далее – УМПХ-2D) [10, 11].

При использовании МПХ и УМПХ для получения «поля» ГДХ используют аппроксимацию базовой ГДХ на номинальной частоте вращения в виде зависимостей отношения давлений и политропного КПД от объемного расхода газа на входе в ЦБК $\varepsilon = \varepsilon(Q_{\text{вх пр}})$, $\eta_{\text{пол}} = \eta_{\text{пол}}(Q_{\text{вх пр}})$, полученную экспериментально при частоте вращения 4 900 об/мин.

При реализации метода УМПХ-2D приняты аналогичные зависимости $\varepsilon = \varepsilon(Q_{\text{вх пр}})$ и $\eta_{\text{пол}} = \eta_{\text{пол}}(Q_{\text{вх пр}})$, полученные экспериментально при частотах вращения 4 900 об/мин, 4 300 об/мин и 3 800 об/мин.

Расчеты выполнялись с использованием Microsoft Excel (пересчет методами МПХ и УМПХ, построение графиков) и Mathcad (расчет коэффициентов для двухпараметрического полинома в методе УМПХ-2D).

Обсуждение результатов. Результаты расчетов представлены на рис.1 – 7. Результаты сравнения основных параметров ГДХ ЦБК ($\eta_{\text{пол}}$ и ε), представлены на рис. 1 и 2.

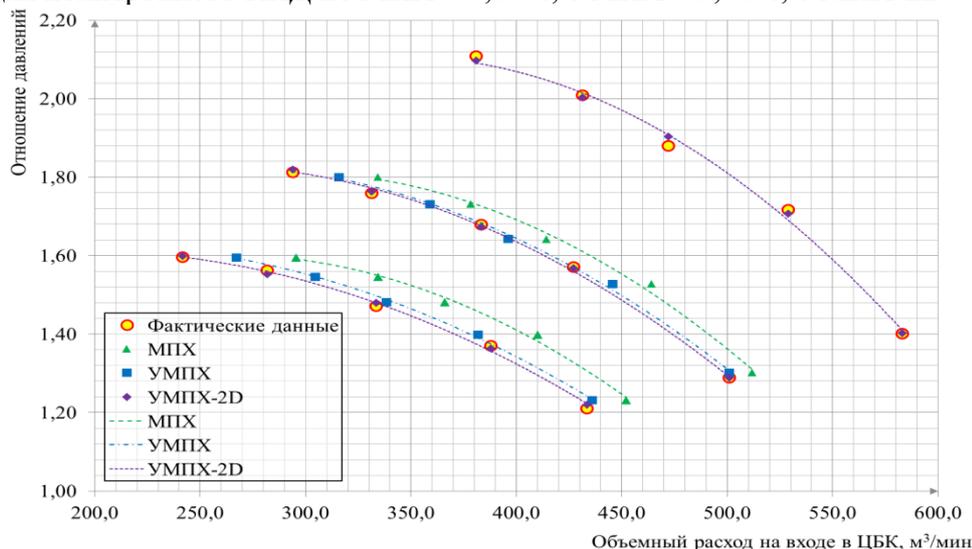
На рис. 3 – 5 представлено сравнение значений политропного КПД в рабочем диапазоне частоты вращения ротора.

На рис. 6 и 7 представлены максимальные погрешности расчета $\eta_{\text{пол}}$ и ε для каждого из примененных методов пересчета характеристик.

Значения погрешностей были получены при сравнении расчетных характеристик с экспериментальными данными при равных объемных расходах ЦБК в рабочем диапазоне расходов и частот вращения ротора ЦБК.

Из анализа данных рис. 1 – 7 следует, что максимальное отклонение расчетных значений от экспериментальных данных составляет:

- 1) для отношений давлений по МПХ – 4,17%, УМПХ – 0,90%, УМПХ-2D – 0,56%;
- 2) для политропного КПД по МПХ – 9,57%, УМПХ – 3,78%, УМПХ-2D – 2,77%.



Параметры приведения ГДХ: $z \cdot R = 488,9 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$, $T_{\text{вх}} = 288 \text{ К}$, $P_{\text{вх}} = 2,0 \text{ МПа}$

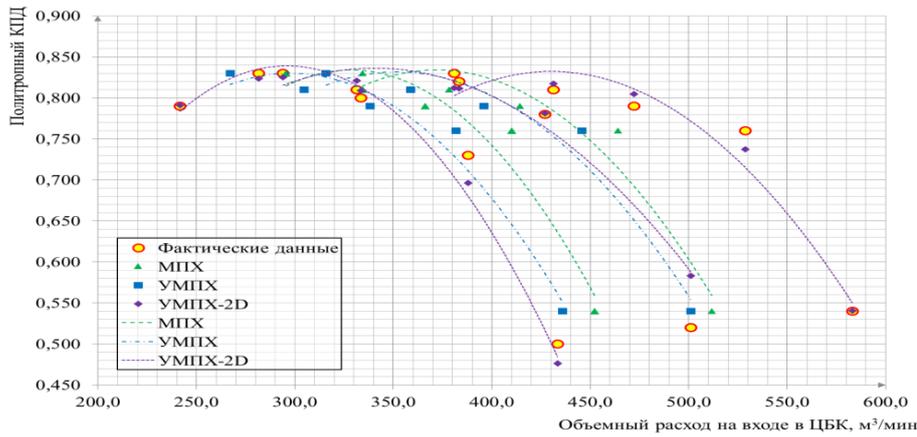
МПХ – метод приведенных характеристик, УМПХ – уточненный метод приведенных характеристик, УМПХ-2D – метод двумерной аппроксимации

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

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

Соответственно, погрешность оценки параметров ЦБК с отношением давлений до 1,9...2,1 при использовании МПХ значительно выше, чем при использовании УМПХ, а применение УМПХ-2D позволяет добиться наименьших отклонений результатов моделирования от фактических данных. Для МПХ характерно увеличение погрешности по мере удаления рассчитываемой характеристики от базовой (рис. 6 и 7).

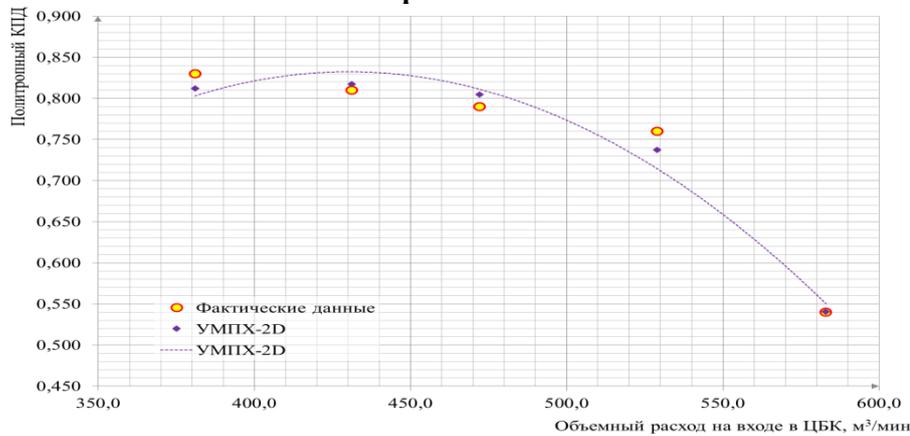
Также наблюдается увеличение погрешности с увеличением объемного расхода, а более детальные исследования данного тренда будут произведены в последующих работах по мере накопления статистической информации о точности методов пересчета ГДХ высоконапорных ЦБК.



Параметры приведения ГДХ: $z \cdot R = 488,9 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$, $T_{ex} = 288 \text{ К}$, $P_{ex} = 2,0 \text{ МПа}$

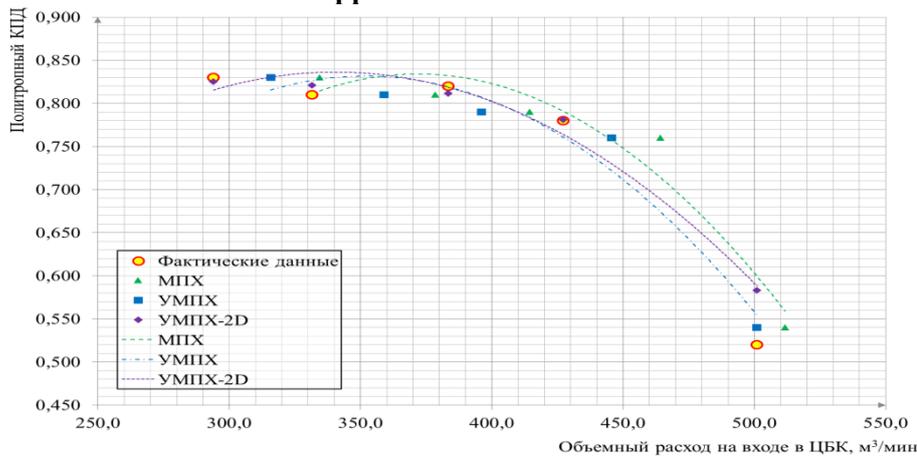
МПХ – метод приведенных характеристик, УМПХ – уточненный метод приведенных характеристик,
 УМПХ-2D – метод двухмерной аппроксимации

Рис. 2. Сравнение результата пересчета КПД политропного по различным методикам и экспериментальных данных
Fig. 2. Comparison of the result of recalculation of polytropic efficiency using various methods and experimental data



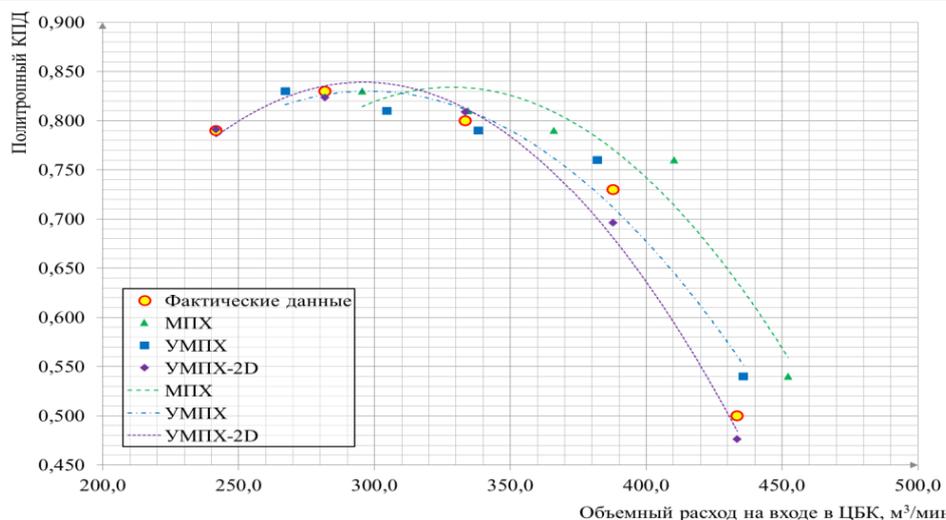
УМПХ-2D – метод двухмерной аппроксимации

Рис. 3. Политропный КПД при частоте вращения 4 900 об/мин по результатам испытаний и пересчета методом двухмерной аппроксимации
Fig. 3. Polytropic efficiency at 4,900 rpm based on test results and recalculation by two-dimensional approximation method



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

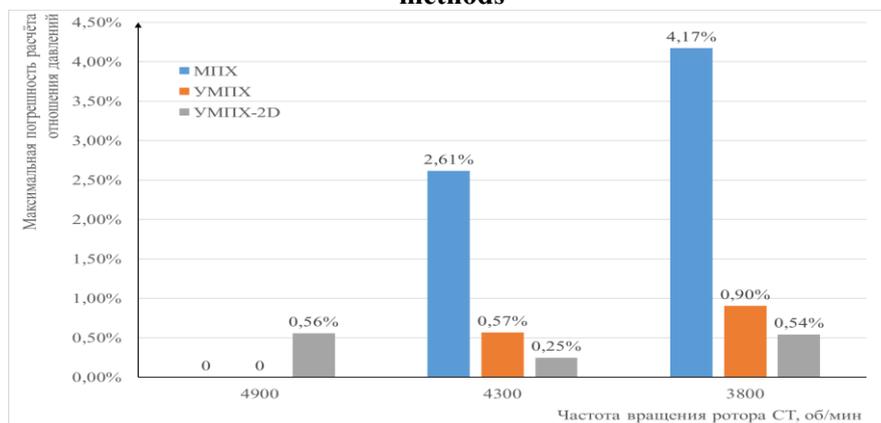
Рис. 4. Политропный КПД при частоте вращения 4 300 об/мин по результатам испытаний и пересчета различными методами
Fig. 4. Polytropic efficiency at 4,300 rpm based on test results and recalculation using various methods



МПX – метод приведенных характеристик, УМПX – уточненный метод приведенных характеристик, УМПX-2D – метод двухмерной аппроксимации

Рис. 5. Политропный КПД при частоте вращения 3 800 об/мин по результатам испытаний и пересчета различными методами

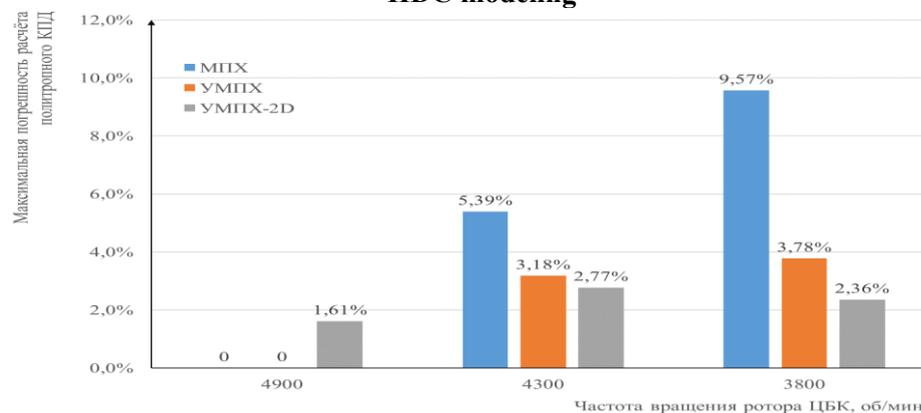
Fig. 5. Polytropic efficiency at 3,800 rpm based on test results and recalculation using various methods



МПX – метод приведенных характеристик, УМПX – уточненный метод приведенных характеристик, УМПX-2D – метод двухмерной аппроксимации

Рис. 6. Сравнение точности определения отношения давления для рассмотренных способов моделирования ГДХ

Fig. 6. Comparison of the accuracy of determining the pressure ratio for the considered methods of HDC modeling



МПX – метод приведенных характеристик, УМПX – уточненный метод приведенных характеристик, УМПX-2D – метод двухмерной аппроксимации

Рис. 7. Сравнение точности определения политропного КПД для рассмотренных способов моделирования ГДХ

Fig. 7. Comparison of the accuracy of determining the polytropic efficiency for the considered methods of modeling GDC

Полученные результаты в основном коррелируют с результатами, представленными в [10, 11], в том числе, также наблюдается увеличение погрешности с увеличением объемного расхода. Полученные результаты представляют интерес для специалистов в области моделирования работы промысловых ДКС и высоконапорных ЦБК в других областях промышленности.

Кроме того, полученные результаты представляют интерес для накопления статистики с целью разработки подходов к созданию ММ, которые обеспечат повышение точности моделирования высоконапорных ЦБК с использованием ГДХ.

Вывод.

1. Точность математической модели ГДХ ЦБК в составе промысловых ДКС, обеспечивающих работу установок НТС с ТДА, определяет точность оценки энергопотребления и технического состояния ГПА, а также расчетов перспективных режимов работы газоперекачивающего оборудования, которые выполняются с целью решения ряда прикладных задач, включая определение сроков модернизации оборудования или реконструкции станции.

2. По результатам сравнения трех методов математического моделирования ГДХ ЦБК: МПХ, УМПХ и УМПХ-2D – сделаны выводы что при применении метода моделирования УМПХ-2D получены наименьшие погрешности (не более 0,56 % по отношению давлений и не более 2,77 % по КПД), что, в свою очередь, свидетельствует о его наибольшей точности среди рассмотренных методов пересчета ГДХ высоконапорных и многоступенчатых компрессоров.

Данный метод учитывает изменения коэффициента изменения удельного объема, и политропного КПД с изменением условий работы ЦБК. Для использования этого метода потребуется большее количество исходных данных по сравнению с существующими методами – необходимо не менее трех экспериментальных изотерм.

3. Для разработки математических моделей ДКС, обеспечивающих работу установок НТС, рекомендуется использовать метод пересчета ГДХ УМПХ-2D.

Это позволит более точно прогнозировать затраты топливно-энергетических ресурсов при работе ДКС, осуществлять оценку технического состояния во всем рабочем диапазоне расхода и частот вращения ротора ЦБК.

Кроме того, повышается оценка сроков модернизации и реконструкции КС, а также точность результатов расчетных исследований, которые проводятся для обоснования соответствующих наиболее рациональных технико-технологических решений.

Библиографический список:

1. Анализ функциональной надежности работы дожимных компрессорных станций при отклонении фактических показателей эксплуатации от проектных значений. Методический подход и практическая значимость / Воронцов М.А., Грачев А.С., Грачева А.О., Петропавлов В.Е., Киркин М.А. // Компрессорная техника и пневматика. 2023. № 1. С. 32-41.
2. Кильдияров С.С. Разработка метода пересчета газодинамических характеристик многоступенчатых центробежных компрессоров на дожимных компрессорных станциях // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 2022. № 5-6. С. 28-31.
3. Об анализе функциональной надежности работы дожимных компрессорных станций в составе технологических систем обустройства месторождений природного газа / Воронцов М.А., Петропавлов В.Е., Грачев А.С., Козлов А.В. // Компрессорные технологии. 2022. № 6. С. 7-10.
4. Методические подходы к оценке энергоэффективности технологических процессов добычи газа / Воронцов М.А., Хворов Г.А., Нурдинова С.А., Маришкин В.А. // Научно-технический сборник Вести газовой науки. 2017. № 5 (33). С. 42-49.
5. Перспективы применения распределенного компримирования в промысловых системах добычи газа / Воронцов М.А., к.т.н. Ротов А.А., Марушенко И.В., Лаптев Е.М. // Вести газовой науки №4 (20) / 2014.
6. Воронцов М.А., Грачев А.С. О турбомашинах и компрессорах на газовом промысле // Магистральные и промысловые трубопроводы: проектирование, строительство, эксплуатация, ремонт: Научно-технический сборник. Том 2. – Москва: Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, 2017. – С. 43-49.

7. Опыт и перспективы применения турбодетандерных агрегатов на промышленных технологических объектах газовой промышленности России / Хетагуров В.А., Слугин П.П., Воронцов М.А., Кубанов А.Н. // Газовая промышленность. 2018. № 11 (777). С. 14-22.
8. Мониторинг энергоэффективности компримирования газа ДКС на основе фактических характеристик центробежных многоступенчатых компрессоров / Кильдияров С.С., Глазунов В.Ю., Меньшиков С.Н., Полозов В.Н. // Газовая промышленность. 2015. № 2 (718). С. 50-54.
9. Глазунов В.Ю., Хафизов А.Р., Давлетов К.М. Корректировка характеристик газоперекачивающих агрегатов (ГПА) дожимных компрессорных станций (ДКС) в процессе эксплуатации // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. 2013. № 6. С. 210-227.
10. Анализ методов моделирования режимов работы компрессорного оборудования, обеспечивающего работу промысловых установок низкотемпературной сепарации / Воронцов М.А., Глазунов В.Ю., Грачев А.С., Машталир М.С., Поспелов С.А., Чернышев А.В. // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023. Т. 50. № 4. С. 6-16.
11. Воронцов М.А., Глазунов В.Ю., Лопатин А.С. Математическое моделирование режимов работы высоконапорного многоступенчатого центробежного компрессора // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 2016. № 1. С. 25-30.
12. Бухарин Н. Н. Моделирование характеристик центробежных компрессоров.— Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1983.— 214 с.
13. Методы представления газодинамических характеристик центробежных компрессоров природного газа / Барцев И.В., Сальников С.Ю., Синицын Н.С. // Сб. Трудов ВНИИГАЗа. Проблемы развития, реконструкции и эксплуатации газотранспортных систем. М., 2003 - С.314-322.

References:

1. Analysis of functional reliability of booster compressor stations operation at deviation of actual operation indicators from design values. Methodical approach and practical significance / Vorontsov, M.A.; Grachev, A.S.; Gracheva, A.O.; Petropavlov, V.E.; Kirkin, M.A. *Compressor engineering and pneumatics*. 2023;1: 32-41. (In Russ)
2. Kildiyarov S.S. Development of the method of recalculation of gas-dynamic characteristics of multistage centrifugal compressors at booster compressor stations. *Transportation and storage of oil products and hydrocarbon raw materials*. 2022;5-6: 28-31. (In Russ)
3. On the analysis of the functional reliability of the booster compressor stations operation as a part of the technological systems of the natural gas fields development. Vorontsov, M.A.; Petropavlov, V.E.; Grachev, A.S.; Kozlov, A.V. *Compressor technologies*. 2022;6: 7-10. (In Russ)
4. Methodical approaches to energy efficiency assessment of technological processes of gas production / Vorontsov M.A., Khvorov G.A., Nurdinova S.A., Marishkin V.A. *Scientific and Technical Collection Vesti gazovoy nauki*. 2017;5 (33):42-49. (In Russ)
5. Prospects of application of distributed compression in field gas production systems / Vorontsov M.A., PhD Rotov A.A., Marushchenko I.V., Laptev E.M. *Vesti gazovoy nauki*. 2014; 4 (20) (In Russ)
6. Vorontsov M.A., Grachev A.S. About turbomachines and compressors at the gas field // Trunk and field pipelines: design, construction, operation, repair: Scientific and Technical Collection. Vol. 2. - Moscow: Russian State University of Oil and Gas (National Research University) named after I.M. Gubkin, 2017; 2: 43-49. (In Russ)
7. Experience and prospects of turboexpander units application at field process facilities of Russian gas industry / Khetagurov V.A., Slugin P.P., Vorontsov M.A., Kubanov A.N. *Gas Industry*. 2018;11 (777): 14-22. (In Russ)
8. Monitoring of energy efficiency of DCS gas compression based on actual characteristics of centrifugal multistage compressors / Kildiyarov S.S., Glazunov V.Yu., Menshikov S.N., Polozov V.N. *Gas Industry*. 2015;2 (718): 50-54. (In Russ)
9. Glazunov V.Yu., Khafizov A.R., Davletov K.M. Correction of characteristics of gas pumping units (GPA) of booster compressor stations (BCS) in the process of operation. *Electronic scientific journal Oil and Gas Business*. 2013;6: 210-227. (In Russ)
10. Analysis of methods for modeling the modes of operation of compressor equipment, providing the operation of field units of low-temperature separation / Vorontsov, M.A.; Glazunov, V.Y.; Grachev, A.S.; Mashtalir, M.S.; Pospelov, S.A.; Chernyshev, A.V. *Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences*. 2023; 50(4):6-16. (In Russ)
11. Vorontsov M.A., Glazunov V.Yu., Lopatin A.S. Mathematical modeling of operation modes of high-pressure multistage centrifugal compressor. *Transportation and storage of petroleum products and hydrocarbon raw materials*. 2016;1: 25-30. (In Russ)
12. Bukharin N. N. Modeling of characteristics of centrifugal compressors.- L.: Mashinostroenie, Leningr. department, 1983; 214. (In Russ)
13. Methods of representation of gas dynamic characteristics of natural gas centrifugal compressors / Bartsev, I.V.; Salnikov, S.Y.; Sinitsyn, N.S. *Proceedings of VNIIGAZ. Problems of Development, Reconstruction and Operation of Gas Transportation Systems*. М., 2003;314-322. (In Russ)

Сведения об авторах:

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

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

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

Машталир Мария Сергеевна, ведущий инженер группы по энергосбережению и энергоэффективности отдела технического развития управления перспективного развития; mashtalir.m@mail.ru

Поспелов Сергей Александрович, ведущий инженер испытательной лаборатории службы диагностики инженерно-технического центра; pospelov_s91@mail.ru

Чернышев Андрей Владимирович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Вакуумная и компрессорная техника»; chernyshev@bmstu.ru

Information about authors:

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

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

Anatoly S. Grachev, Researcher at the laboratory of field compressor and turbo-refrigeration systems of Gazprom VNIIGAZ LLC, graduate student at the educational center "Energy Efficient Engineering Systems" of ITMO University; grachev.anatoliy@yandex.ru

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

Sergey A. Pospelov, Leading engineer of the testing laboratory of the diagnostic service of the engineering and technical center; pospelov_s91@mail.ru

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

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 02.06.2024.

Одобрена после рецензирования/ Revised 01.07.2024.

Принята в печать/Accepted for publication 01.07.2024.

ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА
ENERGY AND ELECTRICAL ENGINEERING

УДК 621.362: 537.322



DOI: 10.21822/2073-6185-2024-51-3-15-24

Оригинальная статья /Original article

**Термоэлектрическая установка для подъема объектов из неглубоких водоемов
методом намораживания**

О.В. Евдулов, Д.В. Евдулов, И.А. Габитов, М.У. Яхьяев

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

Резюме. Цель. Целью исследования является разработка конструкции термоэлектрической установки для подъема объектов из неглубоких водоемов методом намораживания, а также ее расчет, анализ параметров и электро- и теплофизических характеристик. **Метод.** Исследования основано на применении методов термодинамического анализа, натурального и вычислительного моделирования объектов криогенной техники с целью поиска оптимальных решений по надежности и ресурсу низкотемпературных установок. **Результат.** В состав установки входит водонепроницаемый зонд, на торцевой поверхности которого, обращенной к дну водоема, устанавливаются термоэлектрические модули, отвод теплоты от горячих спаев которых производится за счет системы теплоотвода, выполненной в виде цельнометаллического теплопровода, либо в виде теплового термосифона. Сопряжение объекта, поднимаемого из водоема, и термоэлектрической установки производится через холодную стенку путем намораживания. Произведен расчет термоэлектрической установки и определены ее параметры. Построены графики и получены зависимости, описывающие основные характеристики ТЭМ, входящих в термоэлектрическую установку. Графики представлены при температуре горячих спаев ТЭМ 300 К и достижении таких значений толщины намороженного водного льда на холодной стенке ТУ, которые позволили бы осуществить подъем объектов из водоема глубиной до 4 м. **Вывод.** Определены параметры установки: количество ТЭМ типа DRIFT-1,2 - 8, рабочий диапазон мощностей единичного ТЭМ типа DRIFT-1,2 - от 14 до 40 Вт при среднем перепаде температур между спаями 45 К, ток питания - от 3,8 до 7,6 А при потребляемой мощности от 50 до 200 Вт, холодильный коэффициент - от 0,1 до 0,45, минимальная температура холодной стенки ТУ - 248 К, в качестве системы отвода теплоты от горячих спаев ТЭМ используется тепловой термосифон отечественного производства.

Ключевые слова: подъем объекта, водоем, намораживание, водный лед, термоэлектрическая установка, термоэлектрический модуль, охлаждение, температура, расчет

Для цитирования: О.В. Евдулов, Д.В. Евдулов, И.А. Габитов, М.У. Яхьяев. Термоэлектрическая установка для подъема объектов из неглубоких водоемов методом намораживания. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2024; 51(3):15-24. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-3-15-24

**Thermoelectric installation for lifting objects from shallow reservoirs using
the freezing method**

O.V. Evdulov, D.V. Evdulov, I.A. Gabitov, M.U. Yakhyaev

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

Abstract. Objective. The purpose of the study is to develop the design of a thermoelectric installation for lifting objects from shallow reservoirs using the freezing method, as well as its calculation, analysis of parameters and electrical and thermophysical characteristics. **Method.** The research is based on the use of methods of thermodynamic analysis, full-scale and computational modeling of cryogenic equipment in order to find optimal solutions for the reliability and service life of low-temperature installations. **Result.** The installation includes a waterproof

probe, on the end surface of which, facing the bottom of the reservoir, thermoelectric modules are installed, heat is removed from the hot junctions of which by means of a heat removal system made in the form of an all-metal heat pipe or in the form of a thermal thermosiphon. The connection between the object lifted from the reservoir and the thermoelectric installation is carried out through a cold wall by freezing. The thermoelectric installation was calculated and its parameters were determined. Graphs were constructed and dependencies were obtained describing the main characteristics of TEMs included in the thermoelectric installation. The graphs are presented at a temperature of the hot junctions of the TEM of 300 K and the achievement of such values of the thickness of frozen water ice on the cold wall of the technical device that would allow lifting objects from a reservoir up to 4 m deep. **Conclusion.** The installation parameters have been determined: the number of TEMs of the DRIFT-1.2 type is 8, the operating power range of a single TEM of the DRIFT-1.2 type is from 14 to 40 W with an average temperature difference between the junctions of 45 K, the supply current is from 3.8 to 7.6 A with power consumption from 50 to 200 W, coefficient of performance - from 0.1 to 0.45, minimum temperature of the cold wall of the TU - 248 K, a domestically produced thermal thermosiphon is used as a heat removal system from the hot junctions of the TEM.

Keywords: object lifting, reservoir, freezing, water ice, thermoelectric installation, thermoelectric module, cooling, temperature, calculation

For citation: O.V. Evdulov, D.V. Evdulov, I.A. Gabitov, M.U. Yakhyayev. Thermoelectric installation for lifting objects from shallow reservoirs using the freezing method. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2024; 51(3):15-24. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-3-15-24

Введение. Важной экологической проблемой, ставшей последствием бурной техногенной деятельности в последние десятилетия, является очистка водоемов от затопленных оболочковых объектов [1]. Такие элементы могут содержать токсичные, экологически опасные вещества, попадание которых в водную среду губительно для подводной флоры и фауны, а вместе с ними и для человека (через морепродукты).

Это обуславливает необходимость подъема оболочковых объектов на поверхность водного бассейна для их последующей транспортировки и утилизации.

Сложность данной задачи состоит в том, что стенки объектов зачастую подвержены значительному корзинному износу, исключая механическое воздействие на них, вследствие опасности разрушения. В таких условиях перспективными представляются низкотемпературные методы, основанные на применении водного льда для подъема затопленных объектов.

Для подъема подобных объектов со дна неглубоких водоемов в качестве источника холода могут быть использованы термоэлектрические охлаждающие устройства [2-6]. Перспективы их использования определяются целым рядом преимуществ, которыми они обладают по сравнению с традиционными [7-10].

Это отсутствие движущихся частей в устройстве; сочетание в едином приборе таких традиционно раздельных элементов, как источник холода (теплоты) и теплообменный аппарат; универсальность; возможность работы при любой ориентации и при отсутствии сил гравитации; простота устройства, компактность, взаимозаменяемость; высокая надежность, практически неограниченный срок службы; бесшумность, экологичность.

Однако здесь следует отметить, что при эксплуатации термоэлектрических охлаждающих устройств в данных условиях существуют определенные ограничения, связанные, прежде всего, с водонепроницаемостью системы и работой ее в режиме максимальной эффективности создания водного льда.

Постановка задачи. Целью настоящей работы является разработка конструкции термоэлектрической установки (ТУ) для подъема объектов из неглубоких водоемов методом намораживания, ее расчет, анализ параметров и электро- и теплофизических характеристик.

Методы исследования. Конструктивно исполнение ТУ для подъема объектов из неглубоких водоемов в самом простом виде (рис. 1) может быть осуществлено в виде некоторого протяженного полого водонепроницаемого зонда 1, размеры которого соответствуют глубине водоема.

На торцевой поверхности зонда, направленной к дну водоема, устанавливаются термоэлектрические модули (ТЭМ) 2, выполняющие роль источника холода, также защищенные от попадания воды. ТЭМ 2 контактируют с системой отвода теплоты 3, размещенной внутри зонда.

Система отвода теплоты в зависимости от глубины водоема может быть реализована в виде цельнометаллического теплопровода, либо в виде теплового термосифона [11]. Сопряжение объекта, поднимаемого из водоема и ТУ производится через холодную стенку 4 путем его намораживания.

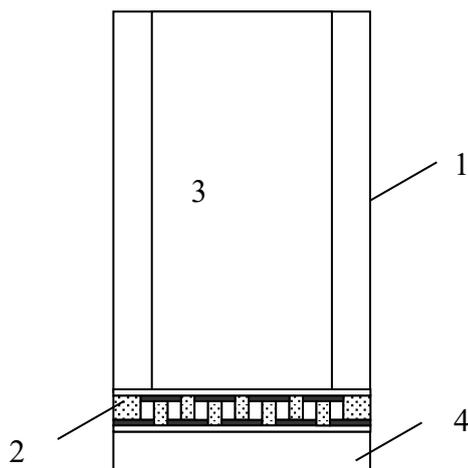


Рис. 1. Упрощенная конструкция ТУ для подъема объектов из неглубоких водоемов методом намораживания

Fig. 1. Simplified design of technical equipment for lifting objects from shallow reservoirs using the freezing method

При эксплуатации холодильного оборудования, на поверхностях его элементов, с отрицательными температурами, работающих без теплоизоляции и погруженных в водную среду, образуется криоосадок из водного льда, термическое сопротивление которого в значительной степени оказывает влияние на теплообмен.

В частности, в условиях образования водного льда могут работать: испарители тепловых насосов с подводом теплоты от водной среды, криогенные газификаторы жидких криопродуктов, водоохладители, ледогенераторы различных конструкций, устройства подъема оболочковых объектов со дна природных водных бассейнов и др.

Анализ теплообмена представляет собой, в общем случае, нестационарную, нелинейную теплофизическую задачу, при решении которой необходимо учитывать рост термического сопротивления криоосадка с течением времени и зависимость коэффициентов теплопроводности водного льда от температуры, при ее значительных перепадах в намораживаемом слое.

Данная задача, связанная с исследованием процессов образования водного льда на поверхностях различной формы достаточно подробно рассмотрена в [12-14].

В этих работах получены соотношения и графики, описывающие процесс образования водного льда на плоской, цилиндрической и сферической поверхностях.

При этом зависимость толщины намороженного слоя водного льда на плоской поверхности, подходящая для описание процессов теплопередачи для предложенной конструкции ТУ, имеет следующий вид:

$$\xi = \frac{\alpha(T_c - T_\phi)}{\rho L} \tau + \frac{\lambda}{\rho L} \sqrt{\left(\frac{\alpha(T_c - T_\phi)\tau}{\lambda}\right)^2 - \frac{2\rho L(T_c - T_\phi)\tau}{\lambda}}, \quad (1)$$

где: T_c - температурой поверхности холодной стенки ТУ,
 T_ϕ - температура фазового перехода вода - лед,
 α - коэффициент теплоотдачи от воды к холодной стенки ТУ,
 ρ - плотность льда,
 τ - время,
 L - теплота фазового перехода воды в лед,
 λ - коэффициент теплопроводности льда.

В соответствии с (1) может быть установлена зависимость толщины намороженного водного льда между ТУ и извлекаемым объектом от температуры холодной стенки установки, которая определяется мощность ТЭМ, входящих в ее состав.

При этом скорость образования намороженного слоя прямо пропорционально зависит от температуры холодной стенки ТУ, и, соответственно, мощностью ТЭМ. А необходимая толщина намороженного слоя льда, требуемая для прочного удержания объекта при его подъеме из водоема, напрямую зависит от массы последнего.

Согласно расчетным соотношениям, приведенным в [15], надежное сцепление холодильника с объектом подъема из водоема массой порядка нескольких килограмм может быть обеспечено при температуре холодной стенки ТУ, начиная от 263 К и ниже.

На основе анализа теплофизических процессов образования водного льда на поверхности холодной стенки ТУ произведен расчет ТЭМ, входящих в ее состав.

Искомые величинами в данном случае являются геометрические размеры термоэлементов, входящих в состав ТЭМ, величина питающего электрического тока, напряжение, потребляемая электрическая энергия, значение холодильного коэффициента, оптимального перепада температур между спаями термоэлементов.

Определение данных характеристик осуществлено на основе методики, аналогичной изложенной в [16] и включающей в себя следующие выражения:

$$Q_{ТЭМ} = nGT_{x.ТЭМ} \frac{s_{ТЭ} t - 1}{\ell_{ТЭ} t + 1} (N_{ТЭ} - t), \quad (2)$$

$$Q'_{ТЭМ} = nGT_{r.ТЭМ} \frac{s_{ТЭ} t - 1}{\ell_{ТЭ} t + 1} (tN_{ТЭ} - 1), \quad (3)$$

$$I_{ТЭМ} = \frac{(N_{ТЭ}^2 - 1)Q_{ТЭМ}}{eN_{ТЭ} (N_{ТЭ} T_{r.ТЭМ} - T_{x.ТЭМ})}. \quad (4)$$

$$\frac{\ell_{ТЭ}}{s_{ТЭ}} = \frac{e(T_{r.ТЭМ} - T_{x.ТЭМ})\sigma_p}{I_{ТЭМ} (N_{ТЭ} - 1) \left(1 + \frac{\sigma_p s_p}{\sigma_n s_n}\right)}, \quad (5)$$

$$\frac{\ell_{ТЭ} / s_p}{\ell_{ТЭ} / s_n} = \sqrt{\frac{\lambda_p \sigma_p}{\lambda_n \sigma_n}}, \quad (6)$$

$$W_{ТЭМ} = I_{ТЭМ}^2 R_{ТЭМ}, \quad (7)$$

$$\eta = \frac{Q_{ТЭМ}}{W_{ТЭМ}}, \quad (8)$$

где: n - количество термоэлементов в ТЭМ, $N_{тэ} = \sqrt{1 + 0,5Z_{тэ}(T_{х.ТЭМ} + T_{г.ТЭМ})}$,

$T_{х.ТЭМ}$ - температура холодных спаев термоэлементов в ТЭМ,

$T_{г.ТЭМ}$ - температура горячих спаев термоэлементов в ТЭМ,

$t = \frac{T_{г.ТЭМ}}{T_{х.ТЭМ}}$, $Z_{тэ} = \frac{e^2}{(\sqrt{\lambda_p \rho_p} + \sqrt{\lambda_n \rho_n})^2}$ - добротность единичного термоэлемента,

e - коэффициент термо-э.д.с. единичного термоэлемента,

$G = \frac{2N_{тэ}}{N_{тэ} - 1} \frac{\sqrt{\lambda_p \rho_p} + \sqrt{\lambda_n \rho_n}}{\sqrt{\lambda_p \rho_n} + \sqrt{\lambda_n \rho_p}} \sqrt{\lambda_n \lambda_p}$, $\lambda_p, \rho_p, \lambda_n, \rho_n$ - удельные коэффициенты теплопровод-

ности и сопротивления ветвей термоэлемента р- и n-типа соответственно,

$S_{тэ}, \ell_{тэ}$ - площадь поперечного сечения и длина ветвей единичного термоэлемента,

σ_p, σ_n - удельные электрические проводимости ветвей термоэлементов р-типа и n-типа соответственно,

$R_{ТЭМ} = n \frac{\ell_{тэ}}{S_{тэ}} (\rho_n + \rho_p)$ - электрическое сопротивление ТЭМ.

На основе выражений (2)-(8) определяются параметры ТЭМ, отражающие его эксплуатационные возможности, а на основе совместного анализа теплофизических процессов, происходящих при образовании водного льда на ТУ и характеристик единичного термомодуля их количество.

При этом расчет системы отвода теплоты от горячих спаев ТУ осуществлен по соотношениям, приведенным в [17, 18].

Обсуждение результатов. На основе проведенных расчетов установлено, что для извлечения объекта из водоема глубиной до 4 м может быть использована ТУ описанной конструкции, содержащая 8 ТЭМ типа DRIFT-1,2, производитель ООО «Криотерм», г. Санкт-Петербург.

Их предельные параметры следующие: максимальная сила тока питания $I_{ТЭМ.max}=7,6$ А, максимальная мощность $Q_{ТЭМ.max}=115$ Вт, максимальное напряжение $U_{ТЭМ.max}=24,6$ В, максимальный перепад температур между спаями $\Delta T_{ТЭМ.max}=69$ К, электрическое сопротивление $R_{ТЭМ}=2,4$ Ом.

На рис. 2-6 представлены зависимости, описывающие основные характеристики данного ТЭМ.

Рассмотрены следующие графики зависимости: изменение мощности, холодильного коэффициента, напряжения питания ТЭМ от перепада температур между спаями для различных значений тока питания (рис. 2-4), вольт-амперная характеристика для различных величин перепада температур между спаями (рис. 5), изменение температуры на холодном спае ТЭМ от тока питания (рис.6).

Графики представлены при температуре горячих спаев ТЭМ 300 К. В соответствии с представленными данными установлено, что рабочий диапазон мощностей единичного ТЭМ типа DRIFT-1,2 будет находиться в пределах от 14 до 40 Вт при среднем перепаде температур между спаями 45 К. При этом ток питания будет составлять 3,8-7,6 А при потребляемой мощности от 50 до 200 Вт.

Холодильный коэффициент изменяется в пределах от 0,1 до 0,45, минимальная температура холодной стенки ТУ будет составлять 248 К. В качестве системы отвода теплоты от горячих спаев ТЭМ может использоваться тепловой термосифон отечественного производства.

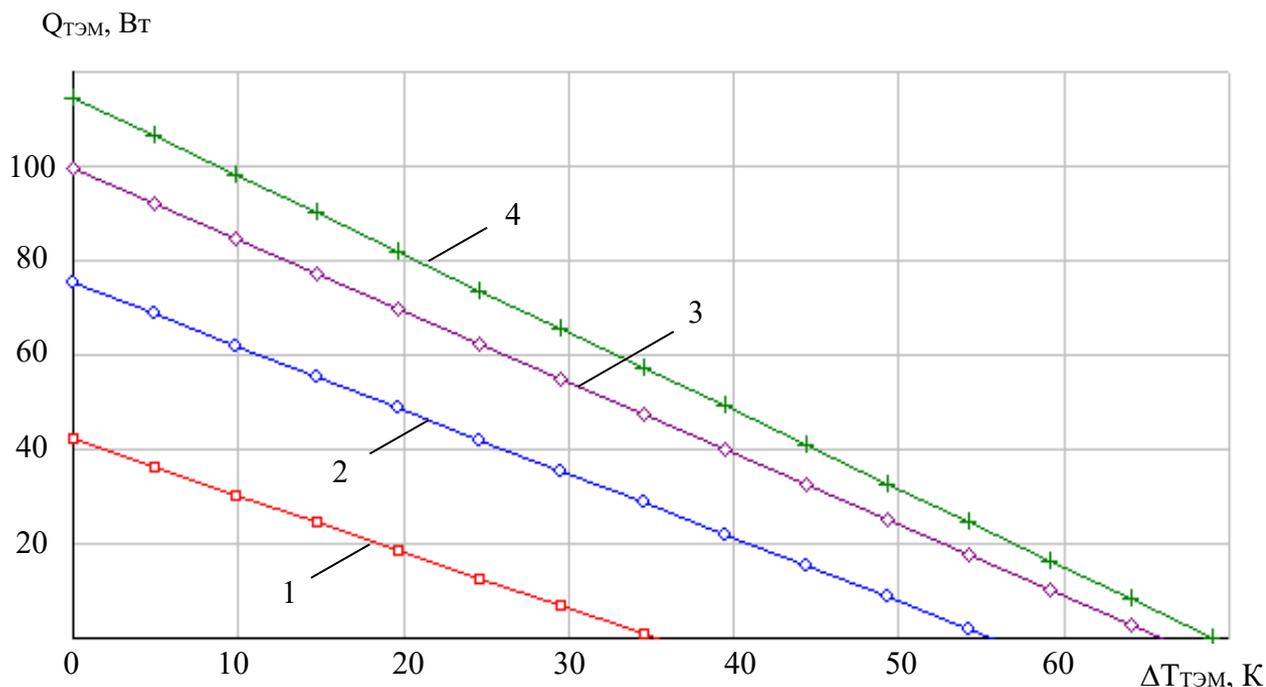


Рис. 2. Зависимость мощности ТЭМ DRIFT-1,2 от перепада температур между спаями при различных значениях тока питания: 1- $I_{TEM}=1,9$ А, 2- $I_{TEM}=3,8$ А, 3 - $I_{TEM}=5,7$ А, 4 - $I_{TEM}=7,6$ А
Fig. 2. Dependence of the power of TEM DRIFT-1.2 on the temperature difference between the junctions at different values of supply current: 1 - $I_{TEM} = 1.9$ А, 2 - $I_{TEM} = 3.8$ А, 3 - $I_{TEM} = 5.7$ А, 4 - $I_{TEM}=7.6$ А

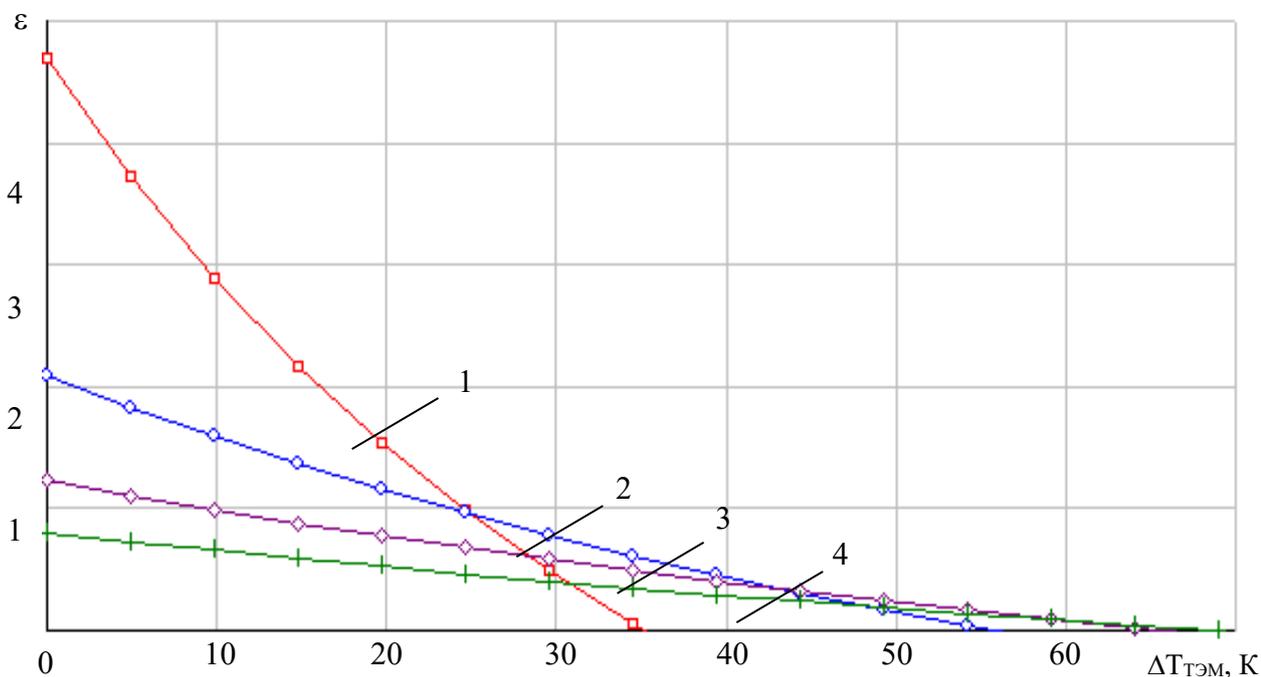


Рис. 3. Зависимость холодильного коэффициента ТЭМ DRIFT-1,2 от перепада температур между спаями при различных значениях тока питания: 1- $I_{TEM}=1,9$ А, 2- $I_{TEM}=3,8$ А, 3 - $I_{TEM}=5,7$ А, 4 - $I_{TEM}=7,6$ А
Fig. 3. Dependence of the performance coefficient of TEM DRIFT-1.2 on the temperature difference between the junctions at different values of supply current: 1 - $I_{TEM} = 1.9$ А, 2 - $I_{TEM} = 3.8$ А, 3 - $I_{TEM} = 5.7$ А, 4 - $I_{TEM}=7.6$ А

$U_{ТЭМ}, В$

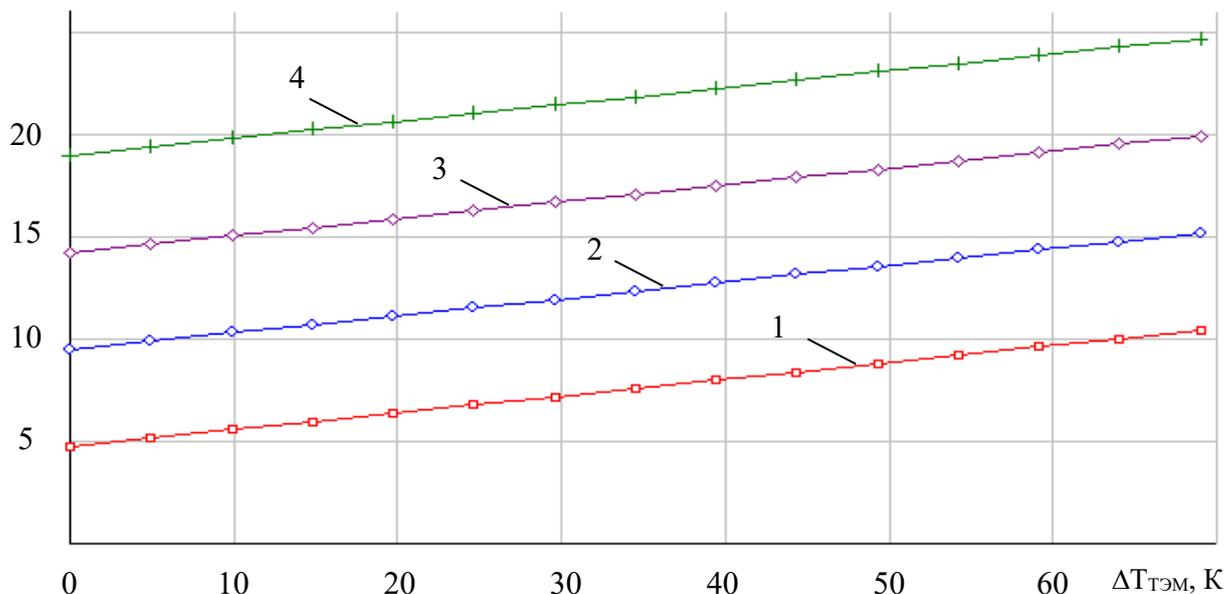


Рис. 4. Зависимость напряжения питания ТЭМ DRIFT-1,2 от перепада температур между спаями при различных значениях тока питания: 1- $I_{ТЭМ}=1,9 А$, 2- $I_{ТЭМ}=3,8 А$, 3 - $I_{ТЭМ}=5,7 А$, 4 - $I_{ТЭМ}=7,6 А$
Fig. 4. Dependence of the supply voltage of TEM DRIFT-1.2 on the temperature difference between the junctions at different values of supply current: 1 - $I_{ТЭМ} = 1.9 А$, 2 - $I_{ТЭМ} = 3.8 А$, 3 - $I_{ТЭМ} = 5.7 А$, 4 - $I_{ТЭМ}=7.6$

$U_{ТЭМ}, В$

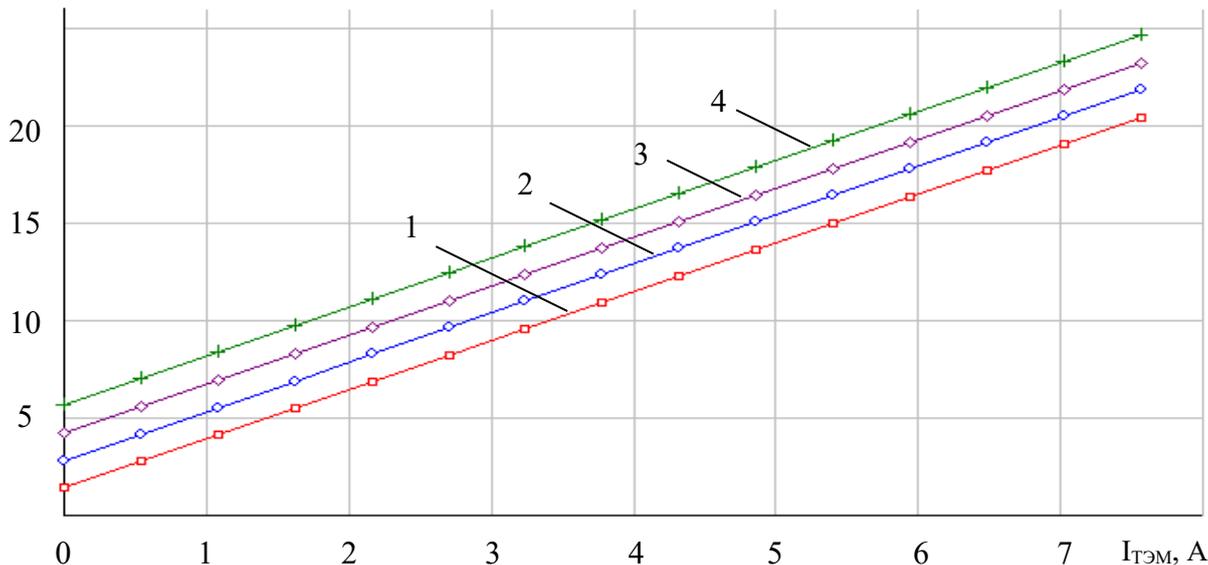


Рис. 5. Зависимость напряжения ТЭМ DRIFT-1,2 от величины тока питания при различных значениях перепада температур между спаями: 1- $\Delta T_{ТЭМ}=17 К$, 2- $\Delta T_{ТЭМ}=35 К$, 3 - $\Delta T_{ТЭМ}=52 К$, 4 - $\Delta T_{ТЭМ}=69 К$
Fig. 5. Dependence of the voltage of TEM DRIFT-1.2 on the value of the supply current at different values of the temperature difference between the junctions: 1- $\Delta T_{ТЭМ}=17 К$, 2- $\Delta T_{ТЭМ}=35 К$, 3 - $\Delta T_{ТЭМ}=52 К$, 4 - $\Delta T_{ТЭМ}=69 К$

$T_{х.ТЭМ}, K$

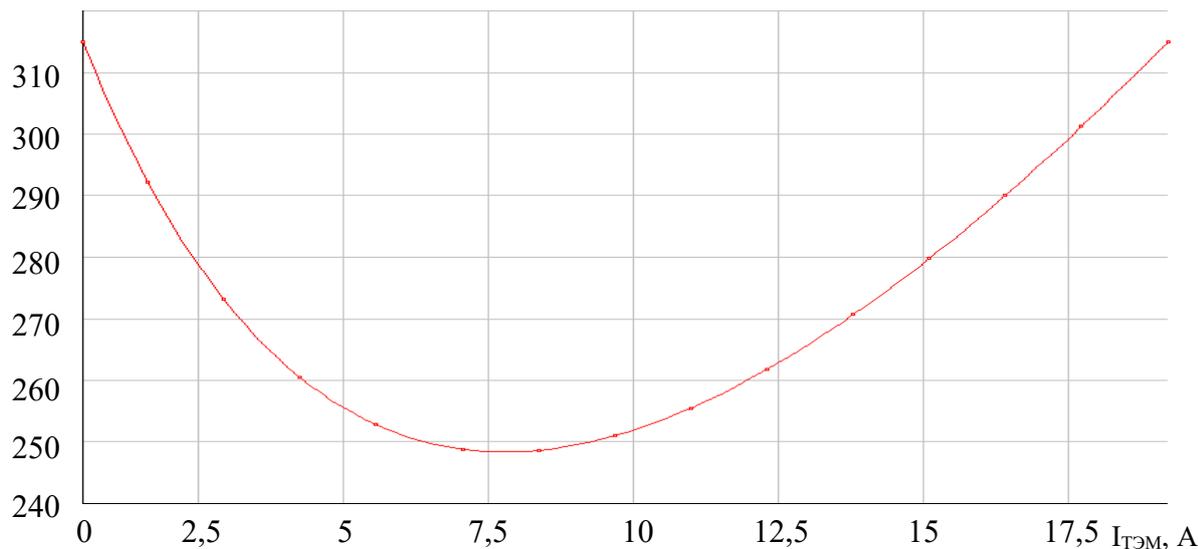


Рис. 6. Зависимость температуры на холодном спае ТЭМ от тока питания
Fig. 6. Dependence of the temperature at the cold junction of the TEM on the supply current

Вывод. Разработана конструкция ТУ для подъема объектов из неглубоких водоемов. В состав упрощенной конструкции установки входит водонепроницаемый зонд, на торцевой поверхности которого, обращенной к дну водоема, устанавливаются ТЭМ, отвод теплоты от горячих спаев которых производится за счет системы теплоотвода, выполненной в виде цельнометаллического теплопровода, либо в виде теплового термосифона.

Сопряжение объекта, поднимаемого из водоема и ТУ производится через холодную стенку путем его намораживания. Произведен расчет параметров ТУ, состоящий в определении толщины замороженного слоя водного льда и скорости его роста, характеристик ТЭМ, входящих в состав установки и системы отвода теплоты от их горячих спаев.

Определены параметры установки: количество ТЭМ типа DRIFT-1,2 - 8, рабочий диапазон мощностей единичного ТЭМ типа DRIFT-1,2 - от 14 до 40 Вт при среднем перепаде температур между спаями 45 К, ток питания - от 3,8 до 7,6 А при потребляемой мощности от 50 до 200 Вт, холодильный коэффициент - от 0,1 до 0,45, минимальная температура холодной стенки ТУ - 248 К, в качестве системы отвода теплоты от горячих спаев ТЭМ используется тепловой термосифон отечественного производства

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. Эгизов И.А., Ордобаев Б.С., Абдыкеева Ш.С. Аварийно-спасательные работы на водных объектах. Бишкек: КРСУ, 2017. 123 с.
2. Finn P.-A., Asker C., Wan K., Bilotti E., Fenwick O., Nielsen C.-B. Thermoelectric materials: current status and future challenges // *Frontiers in electronic materials*. 2021. Vol. 1. P.1-13.
3. Shi X.-L. J., Zou J., Chen Z.-G. Advanced thermoelectric design: from materials and structures to devices // *Chemical reviews*. 2020. Vol. 15. P.7399-515.
4. Snyder G.J., LeBlanc S., Crane D. Distributed and localized cooling with thermoelectrics, [et al.] // *Future energy*. 2021. Vol. 5. P. 748-51.
5. 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.

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. т. 15, № 2. P. 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. Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Магомедов Р.А.-М. Охлаждающие системы на базе сильноточных термоэлектрических полупроводниковых преобразователей. СПб.: Политехника, 2020. 285 с.
9. Yevdulov O.V., Ragimova T.A. Investigation of thermoelectric system for local freezing of tissues of the larynx // *Journal of Thermoelectricity*. 2015. № 2. P. 86-94.
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. 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.
12. 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.
13. Маринюк Б.Т., Королев И.А. Расчет и анализ динамики роста толщины слоя водного инея на охлаждаемой поверхности // *Холодильная техника*. 2016. № 11. С. 38-43.
14. Маринюк Б.Т., Угольников М.А. Динамика намораживания водного льда на трубчатых элементах льдогенераторов // *Холодильная техника*. 2016. №12. С. 44-47.
15. Marinyuk B.T., Ugol'nikova M.A., Serenov I.I. Heat transfer of a straight flat fin surface subjected to low temperature and immersed in an aqueous medium with a constant temperature // *Chemical and petroleum engineering*. 2016. № 11-12. P. 835-837.
16. Васильев Е.Н. Расчет и оптимизация теплообменников термоэлектрического блока охлаждения // *Теплофизика и аэромеханика*. 2022. т. 29, № 3. С.419-430.
17. 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.
18. Исмаилов Т.А., Евдулов Д.В., Евдулов О.В. Системы отвода теплоты от элементов РЭА на базе плавящихся тепловых аккумуляторов // *Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки*. 2015. № 1 (36). С. 38-44.

References:

1. Egizov I.A., Ordobaev B.S., Abdykeeva Sh.S. Emergency rescue operations on water bodies. Bishkek: KRSU, 2017; 123.
2. Finn P.-A., Asker C., Wan K., Bilotti E., Fenwick O., Nielsen C.-B. Thermoelectric materials: current status and future challenges. *Frontiers in electronic materials*. 2021; 1:1-13.
3. Shi X.-L. J., Zou J., Chen Z.-G. Advanced thermoelectric design: from materials and structures to devices. *Chemical reviews*. 2020; 15:7399-515.
4. Snyder G.J., LeBlanc S., Crane D. Distributed and localized cooling with thermoelectrics, [et al.] *Future energy*. 2021; 5: 748-51.
5. 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.
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. Abouellail A.A., Chan Ts., Soldatov A.I., Soldatov A.A., Kostina M.A., Bortalevich S.I., Soldatov D.A. Laboratory substantiation of the thermoelectric method for monitoring the contact resistance. *Defectoscopy*. 2022; 12:70-78. (In Russ)
8. Ismailov T.A., Evdulov O.V., Magomadov R.A.-M. Cooling systems based on high-current thermo-electric semiconductor converters. St. Petersburg: *Politekhnik*, 2020; 285: (In Russ)
9. Yevdulov O.V., Ragimova T.A. Investigation of thermoelectric system for local freezing of tissues of the larynx. *Journal of Thermoelectricity*. 2015; 2: 86-94.
10. Ismailov T.A., Evdulov O.V., Kazumov R.Sh. Experimental studies of flow-type thermoelectric heat exchangers with thermal bridges. *Herald of the International Academy of Refrigeration*. 2010; 4:5-7. (In Russ)
11. Evdulov O.V., Magomedova S.G., Mispakhov I.Sh., Nabiev N.A., Nasrulaev A.M. Thermoelectric system for removing foreign objects from the human body. *Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Sciences*. 2019; 46(1):32-41. (In Russ)

12. Goncharova G.Yu., Pytchenko V.P., Borzov S.S., Borshchev G.V. Study of heat and mass transfer processes during film flow around ice surfaces with a phase transition at the interface. *Herald of the International Academy of Refrigeration*. 2021; 4:3-11. (In Russ)
13. Marinyuk B.T., Korolev I.A. Calculation and analysis of the dynamics of growth of the thickness of the layer of water frost on a cooled surface. *Refrigeration technology*. 2016; 11:38-43. (In Russ)
14. Marinyuk B.T., Ugolnikova M.A. Dynamics of freezing of water ice on tubular elements of ice generators. *Refrigeration equipment*. 2016;12: 44-47. (In Russ)
15. Marinyuk B.T., Ugol'nikova M.A., Serenov I.I. Heat transfer of a straight flat fin surface subject to low temperature and immersed in an aqueous medium with a constant temperature. *Chemical and petroleum engineering*. 2016; 11-12: 835-837.
16. 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)
17. Ibragimova A.M., Evdulov O.V. Thermoelectric semiconductor devices for removing heat from electronic 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). St. Petersburg, 2021; 12-15. (In Russ)
18. Ismailov T.A., Evdulov D.V., Evdulov O.V. Systems for removing heat from electronic elements based on melting heat accumulators. *Herald of the Dagestan State Technical University. Technical Sciences*. 2015;. 1 (36):38-44. (In Russ)

Сведения об авторах:

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

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

Габитов Ильдар Азатович, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры теоретической и общей электротехники; gabitovia@mail.ru.

Яхьяев Магомедхабиб Умарович, аспирант кафедры теоретической и общей электротехники; ktioe@dstu.ru.

Information about authors:

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

Denis V. Evdulov, Cand. Sci. (Eng.), Senior lecturer, Department of Theoretical and General Electrical Engineering evdulovdenis@yandex.ru.

Ildar A. Gabitov, Cand. Sci. (Eng.), Senior lecturer, Department of theoretical and general electrical engineering: gabitovia@mail.ru.

Magomedhabib U. Yakhyaev, Graduate Student, Department of Theoretical and General Electrical Engineering; ktioe@dstu.ru.

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 02.05.2024.

Одобрена после/рецензирования Revised 17.06.2024.

Принята в печать/ Accepted for publication 17.06.2024.

Математическая модель построения матрицы коэффициентов теплопроводности при низкотемпературном воздействии на многослойный эпидермис биологической ткани

Ф.Х. Кудаяева

Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова,
360004, г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является разработка математической модели построения матрицы коэффициентов теплопроводности при низкотемпературном воздействии на многослойный эпидермис биологической ткани. **Метод.** Исследование основано на методах термодинамического анализа, натурального и вычислительного моделирования процессов при низкотемпературном воздействии. **Результат.** Разработана математическая модель матрицы коэффициентов теплопроводности при низкотемпературном воздействии на биологическую ткань. Теплообмен в многослойной среде при низкотемпературном воздействии на биологическую ткань представлен как процесс с дискретным шагом по времени и по координате. Тепловые свойства равномерно распределены по объему слоев биологической ткани. Для воздействия холодом использованы слои эпидермиса биологической ткани, разбитые на равномерные одинаковые ячейки, где площадь ячейки биологической ткани принята равной единице. **Вывод.** Полученные в настоящей работе результаты могут быть полезны специалистам, которые занимаются задачами моделирования в среде со свободными границами.

Ключевые слова: задача фазовыми переходами, матрица коэффициентов теплопроводности, математическая модель, биологическая ткань, низкотемпературное воздействие

Для цитирования: Ф.Х. Кудаяева. Математическая модель построения матрицы коэффициентов теплопроводности при низкотемпературном воздействии на многослойный эпидермис биологической ткани. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2024; 51(3):25-34. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-3-25-34

Mathematical model for constructing a matrix of coefficients thermal conductivity under low-temperature influence on the multilayer epidermis of biological tissue

F.Kh. Kudayeva

H.M. Berbekov Kabardino-Balkar State University,
173 Chernyshevsky St., Nalchik 360004, Russia

Abstract. Objective. The purpose of the study is to develop a mathematical model for constructing a matrix of thermal conductivity coefficients under low-temperature exposure to the multilayer epidermis of biological tissue. **Method.** The research is based on methods of thermodynamic analysis, full-scale and computational modeling of processes under low-temperature influence. **Result.** A mathematical model of the matrix of thermal conductivity coefficients under low-temperature effects on biological tissue has been developed. Heat transfer in a multilayer medium under low-temperature influence on biological tissue is presented as a process with a discrete step in time and coordinate. Thermal properties are evenly distributed throughout the volume of layers of biological tissue. For exposure to cold, layers of the epidermis of biological tissue were used, divided into uniform identical cells, where the cell area of the biological tissue was taken to be equal to one. **Conclusion.** The results obtained in this work can be useful to specialists who deal with modeling problems with free boundaries.

Keywords: the problem of phase transitions, the matrix of thermal conductivity coefficients, mathematical model, biological tissue, low-temperature exposure

For citation: F.Kh. Kudayeva. Mathematical model for constructing a matrix of coefficients thermal conductivity under low-temperature influence on the multilayer epidermis of biological tissue. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2024; 51(3):25-34 DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-3-25-34

Введение. Задача о моделировании и расчете теплопередачи через многослойную среду путем теплопроводности с возможностью возникновения в отдельных слоях фазовых переходов возникает в криомедицине, в криобиологии и в других областях.

В настоящее время значительное внимание при исследовании теплопередачи уделяется теплопроводности в среде с подвижными границами.

При низкотемпературном воздействии на биологические ткани также возникают границы раздела фаз: при переходе из состояния охлаждения в состояние замораживания; из состояния замораживания в состояние криопоражения; и еще подвижная граница области, которая определяется в процессе решения задачи [1,9,13-16,17, 20].

Основной проблемой при низкотемпературном воздействии на биологическую ткань является проблема о распространении температуры по глубине биологические ткани. Как показывают теоретические исследования, создание точной математической модели такого процесса требует учета зависимости коэффициента теплопроводности от температуры и ее градиента $\lambda = \lambda(u, \text{gradu})$ [2,3,10-12,18,19].

Расчет переноса теплоты (холода) в многослойных средах является сложной нелинейной задачей, не имеющей аналитического решения. Конкретизация математической модели при низкотемпературном воздействии требует определения коэффициента теплопроводности λ , отражающая теплофизические свойства слоев биологической ткани [4-8].

Постановка задачи. Цель настоящей работы – разработка математической модели построения матрицы коэффициентов теплопроводности при низкотемпературном воздействии на многослойный эпидермис биологической ткани.

Методы исследования. Рассмотрим теплопроводность через эпидермис биологической ткани, где каждый слой характеризуются теплофизическими свойствами.

Пусть $Q = \{q_j\}$, $j = 1, 2, \dots, m$ – значения количества теплоты (холода) в каждом слое эпидермиса биологической ткани, m – общее число слоев эпидермиса биологической ткани, j – номер слоя, Δt – промежуток времени перехода передачи количества теплоты (холода) из k -го слоя в $k+1$ слой, $\Delta t = \text{const}$.

Непрерывное время t заменим его дискретными моментами: $t_i = i \cdot \Delta t$, где i – целочисленные моменты условного времени. Тогда связь между векторами состояния до и после k -го перехода описывается следующей матричной формулой:

$$Q^{k+1} = P Q^k, \quad (1)$$

где P – матрица переходных вероятностей, элементы которой P_{ij} показывают вероятность перехода количества теплоты (холода) из i -й ячейки в j -ую ячейку слоя биологической ткани.

При различных температурах T_1 и T_2 между слоями возникает тепловой поток, который приведет к изменению количества теплоты (холода) в ячейках, описываемые формулами:

$$\begin{aligned} Q_j^{k+1} &= Q_j^k - \Delta Q_j^k = Q_j^k - \lambda_j S (T_j^k - T_{j+1}^k) \frac{\Delta t}{\Delta x} = \\ &= Q_j^k - \lambda_j S \left(\frac{Q_j^k}{c_j \rho_j V_j \Delta x_j} - \frac{Q_j^{k+1}}{c_j \rho_j V_{j+1} \Delta x_{j+1}} \right) \Delta t = \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned}
 &= \left(1 - \frac{\lambda_j S \Delta t}{c_j \rho_j V_j \Delta x_j}\right) Q_j^k + \frac{\lambda_j S \Delta t}{c_j \rho_j V_{j+1} \Delta x_{j+1}}; \\
 &Q_{j+1}^{k+1} = Q_{j+1}^k + \Delta Q_{j+1}^k = \\
 &= \frac{\lambda_j S \Delta t}{c_j \rho_j V_j \Delta x_j} Q_j^k + \left(1 - \frac{\lambda_j S \Delta t}{c_j \rho_j V_{j+1} \Delta x_{j+1}}\right) Q_{j+1}^k,
 \end{aligned} \tag{3}$$

где λ_j – коэффициент теплопроводности, S_j – площадь поверхности ячейки биологической ткани, V_j – объем ячейки биологической ткани, C_j – теплоемкость слоя биологической ткани, ρ_j – плотность слоя биологической ткани, $h_j, j = 1, 2, \dots, m$ – толщина j-ой ячейки слоя.

Пусть слои биологической ткани для моделирования разбиты на равномерные одинаковые ячейки и пусть площадь ячейки биологической ткани $S=1$.

Предположим, что результирующее распределение температур строится в поперечном направлении, что означает, что модель будет базироваться на одномерной цепи Маркова. Тогда имеют место следующие соотношения:

$$\frac{S}{V_j} = \frac{1}{\Delta x_j}, \quad \frac{S}{V_{j+1}} = \frac{1}{\Delta x_{j+1}}. \tag{4}$$

С учетом (4), соотношения (2), (3) могут быть записаны в матричной форме:

$$\begin{pmatrix} Q_{j+1}^k \\ Q_{j+1}^{k+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \left(1 - \frac{\lambda_j \Delta t}{c_j \rho_j \Delta x_j^2}\right) & \frac{\lambda_j \Delta t}{c_j \rho_j \Delta x_{j+1}^2} \\ \frac{\lambda_j \Delta t}{c_j \rho_j \Delta x_j^2} & \left(1 - \frac{\lambda_j \Delta t}{c_j \rho_j \Delta x_{j+1}^2}\right) \end{pmatrix} \tag{5}$$

Из (2) находим формулу для расчета коэффициента теплопроводности слоев биологической ткани:

$$\lambda_j = \frac{(Q_j^{k+1} - Q_j^k) V_j \Delta x_j R_j V_{j+1} \Delta x_{j+1}}{(Q_{j+1}^{k+1} V_j \Delta x_j - Q_j^k V_{j+1} \Delta x_{j+1}) M}, \tag{6}$$

где $R_j = c_j \rho_j, M = S \Delta t$.

Из (3) получаем:

$$\lambda_j = \frac{R_j (Q_{j+1}^{k+1} - Q_{j+1}^k) V_j \Delta x_j V_{j+1} \Delta x_{j+1}}{M (Q_j^k V_{j+1} \Delta x_{j+1} - Q_{j+1}^k V_j \Delta x_j)}. \tag{7}$$

Чтобы воспользоваться полученными формулами, вычислим количество теплоты (холода), передаваемое за один временной интервал верхнему ($j=1$) слою и нижнему ($j=m$) слою биологической ткани по формулам:

$$\begin{aligned}
 Q_1^{k+1} &= Q_1^k + \alpha_1 S (T_{всл1}^k - T_1^k) \Delta t \\
 Q_m^{k+1} &= Q_m^k + \alpha_2 S (T_{нсл2}^k - T_m^k) \Delta t
 \end{aligned}$$

где α_1, α_2 – коэффициенты теплопередачи, $T_{всл1}^k$ – температура воздуха над верхним слоем биологической ткани, $T_{нсл2}^k$ – температура воздуха под нижним слоем биологической ткани, причем $T_{всл1}^k$ и $T_{нсл2}^k$ имеют постоянные значения в стационарном случае.

Для проверки закона сохранения полного запаса количества теплоты в объеме всех слоев биологической ткани строится переходная матрица вероятностей из k-го слоя в k+1-слой. Структура матрицы переходных вероятностей имеет вид:

$$\begin{array}{cccccc}
 P_{11} & P_{12} & 0 & \dots & 0 & \\
 P_{21} & P_{22} & P_{23} & \dots & 0 & 0 \\
 0 & P_{32} & P_{33} & \dots & 0 & 0 \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 0 & 0 & \dots & \dots & P_{m-1,m-1} & P_{m-1,m} \\
 0 & 0 & \dots & \dots & P_{m,m-1} & P_{m,m}
 \end{array} \quad (8)$$

где

$$P_{j+1,j} = \frac{\lambda_j \Delta t}{R_j \Delta x^2}, \quad P_{j-1,j} = \frac{\lambda_{j-1} \Delta t}{R_j \Delta x^2} \quad (9)$$

где Δx - размер ячейки (площадь поверхности и объем ячейки). Т.к. $S=1$, то объем зависит от толщины $h_j, \quad j = 1, 2, \dots, m$.

Суммарная вероятность матрицы переходных вероятностей равна единице [6]:

$$P_{j,j} + P_{j+1,j} + P_{j-1,j} = 1 \quad (10)$$

Входными данными модели являются: количество ячеек, размер ячейки (толщина ячейки, площадь ячейки равна единице), плотность слоя биологической ткани, теплоемкость слоя биологической ткани, коэффициент теплообмена с окружающей средой, значение температуры внутри слоя биологической ткани, количество временных переходов из одного слоя в другой слой. Для проведения расчетов будем использовать данные, представленные в табл.1.

Таблица 1. Динамика температурного поля
Table 1. Temperature field dynamics

x	T(x)	x	T(x)	x	T(x)
0,01	31,69041	0,11	30,17605	0,22	28,7 661
0,02	31,53647	0,12	30,02765	0,23	28,57364
0,03	31,38308	0,13	29,87981	0,24	28,4312
0,04	31,23026	0,14	29,73251	0,25	28,28929
0,05	31,23026	0,15	29,58576	0,26	28,14792
0,05	30,92628	0,16	29,43955	0,27	28,00708
0,07	30,77513	0,17	29,29388	0,28	27,86676
0,07	30,62453	0,18	29,14876	0,29	27,72697
0,08	30,47448	0,19	29,00417	0,3	27,58771
0,09	30,47448	0,21	28,86012		

Функциональная зависимость температуры от пространственной переменной описывается квадратичной или линейной функцией:

$$T(x) = 6,2718x^2 - 15,831x + 31,828 \quad (11)$$

$$T(x) = -13,892x + 31,728 \quad (12)$$

Для построения матрицы коэффициентов теплопроводности выбрана зависимость (12), а для определения теплового потока используем формулу:

$$Q_j^k = \rho_j c_j \Delta x_j T_j^k, \quad j = 0, 1, 2, \dots, m \quad (13)$$

Как известно из справочных источников, протяженность рогового слоя эпидермиса составляет до 10 мкм, толщина от 100 нм до 1 мкм, от 15 до 20 слоев в толстой коже, от 3 до 4 слоев в тонкой коже.

Для построения матрицы коэффициентов сначала разобьем роговой слой на три слоя, а также разобьем слои на ячейки. Пусть протяженность каждой ячейки составляет 1 мкм. Теплоемкость, плотность, размер ячейки (толщина) представлены в таблицах 2-4.

Таблица 2. Теплоемкость
Table 2. Heat capacity

Теплоемкость Heat capacity										
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0										
1	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6
	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6
	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6
	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6
	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6
	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6
	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6
	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6
2	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6
	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6
	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6
	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6
	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6
	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6
	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6
	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6
	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6
	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6
3	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6
	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6
	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6
	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6
	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6

Таблица 3. Плотность
Table 3. Density

Плотность Density										
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0										
1	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14
	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14
	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14
	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14
	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14
	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14
	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14
	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14
	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14
2	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13

Плотность Density										
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
3	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12
	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12
	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12
	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12
	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12

Таблица 4. Толщина ячейки
 Table 4. Cell thickness

Размер ячейки (толщина) Cell size (thickness)										
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0										
1	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09
2	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11
	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12
	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14
	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16
	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17
	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18
	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19
3	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21
	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22
	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23
	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24
	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25

Площадь ячейки биологической ткани составляет 1. Объем зависит от толщины ячейки. Начальная температура биологической ткани совпадает с температурой $36,6^{\circ}C$, поэтому тепловой поток с внешней среды составляет 0,0184464.

Подставляя входные данные в (13), найдем тепловые потоки для каждого слоя ячейки (табл.5). Проведя расчеты, получим искомую матрицу коэффициентов (табл.6)

Таблица 5. Тепловой поток
Table 5. Heat flow

Тепловой поток Heat flow										
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0	1,81328E-05	1,81E-05								
1	3,62656E-05	3,63E-05								
	5,43984E-05	5,44E-05								
	7,25312E-05	7,25E-05								
	9,0664E-05	9,07E-05								
	0,000108797	0,000109	0,000109	0,000109	0,000109	0,000109	0,000109	0,000109	0,000109	0,000109
	0,00012693	0,000127	0,000127	0,000127	0,000127	0,000127	0,000127	0,000127	0,000127	0,000127
	0,000145062	0,000145	0,000145	0,000145	0,000145	0,000145	0,000145	0,000145	0,000145	0,000145
	0,000163195	0,000163	0,000163	0,000163	0,000163	0,000163	0,000163	0,000163	0,000163	0,000163
2	0,000185214	0,000185	0,000185	0,000185	0,000185	0,000185	0,000185	0,000185	0,000185	0,000185
	0,000202051	0,000202	0,000202	0,000202	0,000202	0,000202	0,000202	0,000202	0,000202	0,000202
	0,000218889	0,000219	0,000219	0,000219	0,000219	0,000219	0,000219	0,000219	0,000219	0,000219
	0,000235726	0,000236	0,000236	0,000236	0,000236	0,000236	0,000236	0,000236	0,000236	0,000236
	0,000252564	0,000253	0,000253	0,000253	0,000253	0,000253	0,000253	0,000253	0,000253	0,000253
	0,000269402	0,000269	0,000269	0,000269	0,000269	0,000269	0,000269	0,000269	0,000269	0,000269
	0,000286239	0,000286	0,000286	0,000286	0,000286	0,000286	0,000286	0,000286	0,000286	0,000286
	0,000303077	0,000303	0,000303	0,000303	0,000303	0,000303	0,000303	0,000303	0,000303	0,000303
	0,000319914	0,00032	0,00032	0,00032	0,00032	0,00032	0,00032	0,00032	0,00032	0,00032
	0,00032639	0,000326	0,000326	0,000326	0,000326	0,000326	0,000326	0,000326	0,000326	0,000326
3	0,000341933	0,000342	0,000342	0,000342	0,000342	0,000342	0,000342	0,000342	0,000342	0,000342
	0,000357475	0,000357	0,000357	0,000357	0,000357	0,000357	0,000357	0,000357	0,000357	0,000357
	0,000373018	0,000373	0,000373	0,000373	0,000373	0,000373	0,000373	0,000373	0,000373	0,000373
	0,00038856	0,000389	0,000389	0,000389	0,000389	0,000389	0,000389	0,000389	0,000389	0,000389
	1,81328E-05	1,81E-05								

Таблица 6. Матрица коэффициента теплопроводности
Table 6. Thermal conductivity matrix

Коэффициент теплопроводности Thermal conductivity coefficient									
	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0									
1	0,000504	0,000504	0,000504	0,00050	0,000504	0,000504	0,000504	0,000504	0,000504
	0,002016	0,002016	0,002016	0,002016	0,002016	0,002016	0,002016	0,002016	0,002016
	0,004536	0,004536	0,0045 6	0,004536	0,004536	0,004536	0,004536	0,004536	0,004536
	0,008064	0,008064	0,008064	0,008064	0,008064	0,008064	0,008064	0,008064	0,008064
	0,0126	0,0126	0,0126	0,0126	0,0126	0,0126	0,0126	0,0126	0,0126
	0,018144	0,018144	0,018144	0,018144	0,018144	0,018144	0,018144	0,018144	0,018144
	0,024696	0,024696	0,024696	0,024696	0,024696	0,024696	0,024696	0,024696	0,024696
	0,032256	0,032256	0,032256	0,032256	0,032256	0,032256	0,032256	0,032256	0,032256
2	0,040824	0,040824	0,040824	0,040824	0,040824	0,040824	0,040824	0,040824	0,040824
	0,056628	0,056628	0,056628	0,056628	0,056628	0,056628	0,056628	0,056628	0,056628
	0,067392	0,067392	0,067392	0,067392	0,067392	0,067392	0,067392	0,067392	0,067392
	0,079092	0,079092	0,079092	0,079092	0,079092	0,079092	0,079092	0,079092	0,079092
	0,091728	0,091728	0,091728	0,091728	0,091728	0,091728	0,091728	0,091728	0,091728
	0,1053	0,1053	0,1053	0,1053	0,1053	0,1053	0,1053	0,1053	0,1053

Коэффициент теплопроводности Thermal conductivity coefficient									
	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	0,119808	0,119808	0,119808	0,119808	0,119808	0,119808	0,119808	0,119808	0,119808
	0,135252	0,135252	0,135252	0,135252	0,135252	0,135252	0,135252	0,135252	0,135252
	0,151632	0,151632	0,151632	0,151632	0,151632	0,151632	0,151632	0,151632	0,151632
	0,168948	0,168948	0,168948	0,168948	0,168948	0,168948	0,168948	0,168948	0,168948
3	0,190512	0,190512	0,190512	0,190512	0,190512	0,190512	0,190512	0,190512	0,190512
	0,209088	0,209088	0,209088	0,209088	0,209088	0,209088	0,209088	0,209088	0,209088
	0,228528	0,228528	0,228528	0,228528	0,228528	0,228528	0,228528	0,228528	0,228528
	0,248832	0,248832	0,248832	0,248832	0,248832	0,248832	0,248832	0,248832	0,248832
	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27

Входные данные: количество (слоев) эпидермиса: 1-ый слой – 2, 2-ой слой – 2, третий слой – 3, количество (ячеек) – 3; область биологической ткани определена ранее, где свободная граница области в расчетах равна 3,5. Область биологической ткани разбита по толщине эпидермиса с шагом $s1/7$, где число 7 – это общее количество слоев эпидермиса. Температуры по слоям найдены по формуле (12) и они соответственно равны: 24,782; 17,836; 10,89; 3,944; -3,002; -9,948; -16,894.

Толщина каждого слоя и температуры для каждого слоя представлены в следующих матрицах:

$$X = \begin{pmatrix} 0.5 & 0.5 & 0.5 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1.5 & 1.5 & 1.5 \\ 2 & 2 & 2 \\ 2.5 & 2.5 & 2.5 \\ 3 & 3 & 3 \\ 3.5 & 3.5 & 3.5 \end{pmatrix},$$

$$T = \begin{pmatrix} 24.782 & 24.782 & 24.784 \\ 17.836 & 17.836 & 17.836 \\ 10.890 & 10.890 & 10.890 \\ 3.944 & 3.944 & 3.944 \\ -3.002 & -3.002 & -3.002 \\ -9.948 & -9.948 & -9.948 \\ -16.894 & -16.894 & -16.894 \end{pmatrix}.$$

Теплоемкость в первом слое – 0,36; во втором слое – 0,36; в третьем слое – 0,37.

Плотность в первом слое – 0,12; во втором слое – 0,14; в третьем слое – 0,15.

Площади ячеек равны единице, а объем зависит от толщины ячеек слоя.

Суммарное время воздействия (сек) составляет: первый слой – 4,28571428571429; второй слой – 8,57142857142857; третий слой – 12,8571428571429; четвертый слой – 17,1428571428571; пятый слой – 21,4285714285714; шестой слой – 25,7142857142857; седьмой слой – 30.

Коэффициент теплоотдачи в верхний слой биологической ткани составляет – 0,5, а коэффициент теплоотдачи под нижний слой биологической ткани – 0,4, температура внешней среды биологической ткани – 28, температура под нижним слоем биологической ткани – 36.

Применяя формулу (13) найдены тепловые потоки по слоям биологической ткани:

$$Q = \begin{pmatrix} 0,53552912 & 0,53552912 & 0,53552912 \\ 0,7705152 & 0,7705152 & 0,7705152 \\ 0,823284 & 0,823284 & 0,823284 \\ 0,3975552 & 0,3975552 & 0,3975552 \\ -0,416527 & -0,416527 & -0,416527 \\ -1,656342 & -1,656342 & -1,656342 \\ -3,28165 & -1,656342 & -1,656342 \end{pmatrix}.$$

Искомая матрица коэффициентов теплопроводности:

$$\lambda = \begin{pmatrix} 0,091679977062062 & 0,091679977062062 & 0,091679977062062 \\ 0,00110622549875965 & 0,00110622549875965 & 0,00110622549875965 \\ 0,171871097226895 & 0,171871097226895 & 0,171871097226895 \\ 0,0570738774339374 & 0,0570738774339374 & 0,0570738774339374 \\ 0,0734024252925542 & 0,0734024252925542 & 0,0734024252925542 \\ 0,11916360421385 & 0,11916360421385 & 0,11916360421385 \\ 0,478894111842568 & 0,478894111842568 & 0,478894111842568 \end{pmatrix}$$

Вывод. Полученные результаты показывают изменение коэффициента теплопроводности эпидермиса по выделенным слоям. Что касается других слоев кожи (дерма, гиподерма), то этот вопрос остается открытым.

Это связано с тем, что низкотемпературное воздействие на эти слои в силу их сложной структуры (наличие кровеносных сосудов и др.) может привести к необратимым процессам.

Библиографический список:

1. Артюхов И.В., Карнаухов А.В. Криосохранение крупных биологических объектов. Сборник трудов института биомедицинских технологий, института биофизики клетки РАН. 2004
2. Березовский А.А., Леонтьев Ю.В. Математическое прогнозирование криовоздействия на биологические ткани/Криобиология. Киев. Наука думка. 1989.- С.7-13
3. Данилюк И. И. О задаче Стефана // Успехи математических наук. 1985. Т. 40. № 5. С. 133-185.
4. Избранные труды М.Х.Шханукова-Лафишева под.ред. П.Н. Вабищевича, А.А. Алиханова, М.Х. Бештокова. Нальчик, изд.М.и В. Котляровых, 2021. – 288с.
5. Кудяева Ф.Х. Задачи с фазовыми переходами при низкотемпературном воздействии на биоткани. Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. 2023. Т. 13. № 3. С.21-27
6. Кудяева Ф.Х., Вешнева И.В. Построение матрицы коэффициентов теплопроводности. Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. 2023. Т. 13. № 4. С.21-26.
7. Кудяева Ф.Х., Кайгермазов А.А., Кармоков М.М., Мамбетов М.Ж., Долова М.Х. Математическая модель криодеструкции биологической ткани // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 2. ISSN 2070-7428. URL: www.science-education.ru/129-22558.
8. Кудяева Ф.Х., Кайгермазов А.А. Математическая модель влияния физико-химических факторов на биологическую ткань при криодеструкции. Математические методы в технологиях и технике. 2022. № 1. С. 73-76.
9. Лозина-Лозинский Л.К. Очерки по криобиологии. Адаптация и устойчивость организмов и клеток к низким и сверхнизким температурам. Л.: Наука, 1972. 288 с.
10. Павлов А. Р. Математическое моделирование процессов тепломассопереноса при фазовых переходах: учебное пособие. Якутск, 2001. 58 с.
11. Пушкарева А.Е. Методы математического моделирования в оптике биоткани. Учебное пособие. СПб: СПбГУ ИТМО, 2008. — 103 с.
12. Ремизов А.Н. Медицинская и биологическая физика: Учеб. для вузов. — 4-е изд., перераб. и дополн. -М.: Дрофа, 2003. — 560 с.
13. Математическое моделирование. Процессы в нелинейных средах. Отв. ред. А.А. Самарский, С.П. Курдюмов, В.А. Галактионов. -М.: Наука, 1986. – 312 с.
14. Математическое моделирование. Методы описания и исследования сложных систем. Отв. ред. А.А. Самарский, Н.Н. Моисеев, А.А. Петров. -М.: Наука, 1989. – 271 с.
15. Самарский А.А., Курдюмов С.П., Ахромеева Т.С., Малинецкий Г.Г. Нестационарные структуры и диффузионный хаос. М.Наука, 1991, 560 с.
16. Шафранов В.В., Цыганов Д.И., Поляев Ю.А. Возможности криохирургии // Анналы хирургии. 1996. №4. С.47.
17. E.Tyulkina, P.Vassiliev, T. Janovsky, and M. Shcherbakov. Evaluation of Interaction Level between Potential Drug and Protein by Hydrogen Bond Energy Calculation./ Knowledge-BasedSoftware Engineering, A. Kravets, M.Shcherbakov, M.Kultsova, Tadashi Iijima (Eds.), 11th Joint Conference, JCKBSE 2014, Volgograd, Russia, September 17-20, 2014, Proceedings, DOI 10.1007/978-3-319-11854-3, Springer Cham Heidelberg New York Dordrecht London, Pp. 542-556
18. Harvard University: Artificial Intelligence in Medicine: Applications, implications, and limitations. [Electronic resource]. URL: <https://sitn.hms.harvard.edu/flash/2019/artificial-intelligence-in-medicine-applications-implications-and-limitations/> (accessed 10.05.2022)
19. Cryodestruction of brain tumors / S. Vasiliev, V. Krylov, S. Pesnya-Prasolov, A. Zuev, A. Vyatkin, T.Galyan, S.Kungurcev, V.Pavlov : материалы the 39th annual meeting of the Japan society for low temperature medicine «Cryomedicine 2012» (Japan, Tokyo, 21-22.11.2012). – P. 43–44
20. Carpenter J. F., Crowe J. H. The mechanism of cryoprotection of proteins by solutes // Cryobiology. 1988. V. 25. P. 244–255., Clarke A., Morris G. J., Fonseca F. et al. A low temperature limit for life on Earth // PLoS One. 2013. V. 8. e66207. DOI: 10.1371/journal.pone.0066207

References:

1. Artyukhov I.V., Karnaukhov A.V. Cryopreservation of large biological objects. Proceedings of the Institute of Biomedical Technologies, Institute of Cell Biophysics of the Russian Academy of Sciences. 2004 (In Russ)
2. Berezovsky A.A., Leontiev Yu.V. Mathematical prediction of cryotherapy on biological tissues. *Cryobiology*. Kyiv. Naukova dumka. 1989;7-13.
3. Danilyuk I. I. On the Stefan problem. *Successes of mathematical sciences*. 1985;40(5):133-185. (In Russ)
4. Selected works of M.H.Shkhanukov-Lafishev, edited by P.N. Vabishevich, A.A. Alikhanov, M.H. Beshtokov. Nalchik, ed.M. and V. Kotlyarov, 2021; 288. (In Russ)
5. Kudayeva F.Kh. Problems with phase transitions under low-temperature exposure to biological tissues. *Proceedings of Kabardino-Balkarian State University*. 2023;13(3):21-27(In Russ)
6. Kudayeva F.Kh., Veshneva I.V. Construction of a matrix of thermal conductivity coefficients. *Proceedings of Kabardino-Balkarian State University*. 2023;13(4.):21-26. (In Russ)
7. Kudayeva F.Kh., Kaygermazov A.A., Karmokov M.M., Mambetov M.J., Dolova M.Kh. Mathematical model of cryodestruction of biological tissue. *Modern problems of science and education*. 2015; 2. ISSN 2070-7428. URL: www.science-education.ru/129-22558. (In Russ)
8. Kudayeva F.Kh., Kaygermazov A.A. Mathematical model of the influence of physico-chemical factors on biological tissue during cryodestruction. *Mathematical methods in technology and engineering*. 2022;1:73-76. (In Russ)
9. Lozina-Lozinsky L.K. Essays on cryobiology. Adaptation and resistance of organisms and cells to low and ultra-low temperatures. L.: Nauka, 1972; 288. (In Russ)
10. Pavlov A. R. Mathematical modeling of heat and mass transfer processes in phase transitions: a textbook. Yakutsk, 2001; 58. (In Russ)
11. Pushkareva A.E. Methods of mathematical modeling in biotissue optics. A study guide. St. Petersburg: St. Petersburg State University ITMO, 2008; 103. (In Russ)
12. Remizov A.N. Medical and biological physics: Studies for universities. — 4th ed., reprint. and the supplement. -M.: Drofa, 2003; 560. (In Russ)
13. Mathematical modeling. Processes in nonlinear media. Ed. A.A. Samarsky, S.P. Kurdyumov, V.A. Galaktionov. M.: Nauka, 1986; 312. (In Russ)
14. Mathematical modeling. Methods of description and research of complex systems. Ed. A.A. Samarsky, N.N. Moiseev, A.A. Petrov. M.: Nauka, 1989; 271. (In Russ)
15. Samarskiy A.A., Kurdyumov S.P., Akhromeeva T.S., Malinetsky G.G. Unsteady structures and diffusion chaos. M.Nauka, 1991; 560. (In Russ)
16. Shafranov V.V., Tsyganov D.I., Polyayev Yu.A. Possibilities of cryosurgery. *Annals of surgery*. 1996;4:47. (In Russ)
17. E.Tyulkina, P.Vassiliev, T. Janovsky, and M. Shcherbakov. Evaluation of Interaction Level between Potential Drug and Protein by Hydrogen Bond Energy Calculation./ Knowledge-Based Software Engineering, A. Kravets, M. Shcherbakov, M. Kultsova, Tadashi Iijima (Eds.), 11th Joint Conference, JCKBSE 2014, Volgograd, Russia, September 17-20, 2014, Proceedings, DOI 10.1007/978-3-319-11854-3, Springer Cham Heidelberg New York Dordrecht London, P. 542-556
18. Harvard University: Artificial Intelligence in Medicine: Applications, implications, and limitations. [Electronic resource]. URL: <https://sitn.hms.harvard.edu/flash/2019/artificial-intelligence-in-medicine-applications-implications-and-limitations/> (accessed 10.05.2022)
19. Cryodestruction of brain tumors / S. Vasiliev, V. Krylov, S. Pesnya-Prasolov, A. Zuev, A. Vyatkin, T.Galyan, S.Kungurcev, V.Pavlov : материалы the 39th annual meeting of the Japan society for low temperature medicine «Cryomedicine 2012» . Japan, Tokyo, 21-22.11.2012;43–44.
20. Carpenter J. F., Crowe J. H. The mechanism of cryoprotection of proteins by solutes. *Cryobiology*. 1988; 25:244–255., Clarke A., Morris G. J., Fonseca F. et al. A low temperature limit for life on Earth // *PLoS One*. 2013. V. 8. e66207. DOI: 10.1371/journal.pone.0066207

Сведения об авторе:

Кудаева Фатимат Хусейновна, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры прикладной математики и информатики института искусственного интеллекта и цифровых технологий; kfatimat@yandex.ru; ORCID:0000-0002-1026-3280

Information about author:

Fatimat Kh. Kudaeva, Cand. Sci. (Physical and Mathematical), Assoc. Prof., Assoc. Prof., Department of Applied Mathematics and Computer Science, Institute of Artificial Intelligence and Digital Technologies; kfatimat@yandex.ru; ORCID:0000-0002-1026-3280

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 21.05.2024.

Одобрена после рецензирования/ Revised 19.06.2024.

Принята в печать/Accepted for publication 19.06.2024.

ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА
ENERGY AND ELECTRICAL ENGINEERING

УДК 621.71



DOI: 10.21822/2073-6185-2024-51-3-35-41

Обзорная статья / Review article

Методика охлаждения серверных помещений

Е.И. Страшко, И.А. Шорсткий, Р.А. Жлобо

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

Резюме. Цель. В современном мире, где количество данных растёт с каждым днем, важность надежных и эффективных центров обработки данных (ЦОД) становится все более очевидной. Одним из ключевых аспектов поддержания работоспособности и надежности ЦОД является обеспечение адекватного охлаждения серверных помещений. Данная научная работа посвящена изучению и анализу различных методик охлаждения, используемых в серверных помещениях. **Метод.** Исследование основано на методах термодинамического анализа для оптимизации систем охлаждения с целью повышения их эффективности и снижения энергопотребления. **Результат.** В работе рассматриваются как традиционные системы охлаждения, так и современные инновационные решения, позволяющие повысить эффективность охлаждения при одновременном снижении энергопотребления. Авторы проводят сравнение различных методов охлаждения, оценивают их преимущества и недостатки, а также анализируют потенциальные экономические и экологические выгоды от внедрения передовых технологий в практику управления серверными помещениями. **Вывод.** Выбор оптимального метода охлаждения должен учитывать специфику серверного оборудования, тепловые нагрузки, размер помещения и другие факторы. Важно также уделить внимание обслуживанию и выбору оптимальной системы охлаждения в соответствии с потребностями и характеристиками серверного оборудования.

Ключевые слова: центры обработки данных, серверные помещения, системы охлаждения, энергоэффективность, инновационные решения, экономическая эффективность, экологическая безопасность

Для цитирования: Е.И. Страшко, И.А. Шорсткий, Р.А. Жлобо. Методика охлаждения серверных помещений. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2024; 51(3):35-41. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-3-35-41

Method of cooling server rooms

E.I. Strashko, I.A. Shortskey, R.A. Zhlobo

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

Abstract. Objective. In today's world, where the amount of data is growing every day, the importance of reliable and efficient data centers (DPCs) is becoming increasingly clear. One of the key aspects of maintaining data center availability and reliability is ensuring adequate cooling of server rooms. This scientific work is devoted to the study and analysis of various cooling techniques used in server rooms. **Method.** The study is based on thermodynamic analysis methods to optimize cooling systems to improve their efficiency and reduce energy consumption. **Result.** The work examines both traditional cooling systems and modern innovative solutions that improve cooling efficiency while reducing energy consumption. The authors compare different cooling methods, evaluate their advantages and disadvantages, and analyze the potential economic and environmental benefits of introducing advanced technologies into server room management practices. **Conclusion.** The choice of the optimal cooling method should take into account the specifics of the server equipment, thermal loads, room size and other factors. It is also important to pay attention to maintenance and selection of the optimal cooling system in accordance with the needs and characteristics of the server equipment.

Keywords: data processing centers, server rooms, cooling systems, energy efficiency, innovative solutions, economic efficiency, environmental safety

For citation: E.I. Strashko, I.A. Shortskey, R.A. Zhlobo. Method of cooling server rooms. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2024; 51(3):35-41. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-3-35-41

Введение. В условиях глобальной информатизации общества и непрерывного роста объемов цифровых данных, центры обработки данных (ЦОД) становятся критически важными элементами инфраструктуры любой организации. Однако, с увеличением мощности и плотности размещения серверного оборудования возрастает и выделение тепла, что делает вопросы эффективного охлаждения серверных помещений особенно актуальными. Неадекватное охлаждение может привести к перегреву оборудования, снижению его производительности и даже выходу из строя, что в свою очередь может вызвать серьезные финансовые и репутационные потери для организации. В этой связи, разработка и внедрение эффективных методик охлаждения серверных помещений является первоочередной задачей.

Постановка задачи. Целью исследования является анализ существующих методов охлаждения серверных помещений, выявление их преимуществ и недостатков, а также разработка рекомендаций по оптимизации систем охлаждения с целью повышения их эффективности и снижения энергопотребления.

Методы исследования. В рамках исследования были рассмотрены различные системы охлаждения, включая традиционные системы кондиционирования воздуха, системы охлаждения с использованием воды, а также инновационные решения, такие как охлаждение с использованием внешнего воздуха и системы охлаждения на основе тепловых насосов. Для сравнительного анализа использовались критерии, такие как энергоэффективность, стоимость внедрения и эксплуатации, а также потенциальное влияние на окружающую среду. Методы исследования включали в себя анализ научной литературы, моделирование работы систем охлаждения и экспериментальные исследования в реальных условиях эксплуатации ЦОД.

Обсуждение результатов. Исследование показало, что применение инновационных методов охлаждения может значительно повысить эффективность работы серверных помещений при одновременном снижении энергопотребления.

В частности, использование систем охлаждения с применением внешнего воздуха и тепловых насосов позволяет существенно сократить потребление электроэнергии по сравнению с традиционными системами кондиционирования. Однако, успешное внедрение таких систем требует тщательного планирования и учета множества факторов, включая климатические условия региона, характеристики здания и специфику размещенного в нем оборудования. В работе также обсуждаются вопросы экономической и экологической эффективности различных методов охлаждения, а также предлагаются рекомендации по выбору оптимальных решений для конкретных условий эксплуатации ЦОД [1, С. 131-135].

1. Прецизионные кондиционеры. Принцип работы прецизионных кондиционеров основан на циклическом преобразовании хладагента из газообразного в жидкое состояние и обратно (рис.1). Этот процесс сопровождается изменениями давления внутри системы. Прецизионные кондиционеры функционируют по той же основной схеме, что и стандартные климатические устройства: газообразный хладагент сжимается в компрессоре, затем проходит через конденсатор, где происходит конденсация и отдача тепла, превращая вещество в жидкость [2, С. 107-115].

Жидкий хладагент поступает в испаритель, где возвращается в газообразное состояние. На последнем этапе цикла хладагент возвращается в компрессор. Воздушная циркуляция осуществляется через испаритель, где воздух из помещения проходит охлаждение. Этот процесс обеспечивает эффективное охлаждение и поддержание оптимальной температуры внутри помещения [3, С. 192-196.].

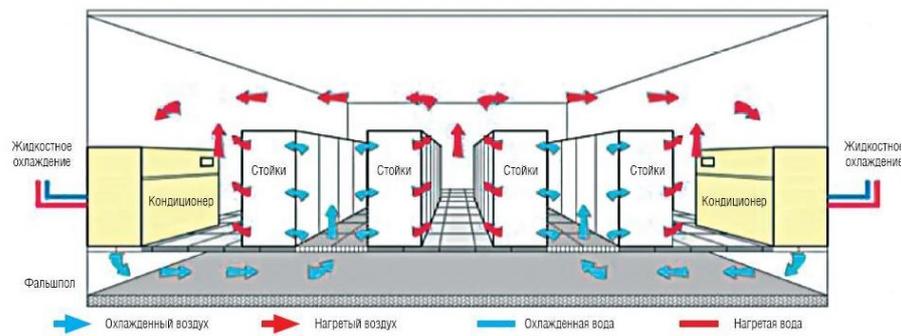


Рис. 1. Принцип охлаждения с помощью прецизионного кондиционера
Fig. 1. Cooling principle with precision air conditioner

2. Сплит-системы. Сплит-системы представляют собой простое и доступное решение для охлаждения серверных помещений. Бытовые и полупромышленные модели сплит-систем успешно справляются с задачей охлаждения серверов. Бытовые сплит-системы отличаются удобством в установке и настройке, что позволяет разместить блок в ограниченном пространстве. Полупромышленные модели обычно оснащены зимним комплектом и предназначены для работы на больших площадях [4, С. 130-139].

Преимущества сплит-систем включают в себя широкий выбор модулей, способных адаптироваться к различным условиям эксплуатации, доступность по цене по сравнению с другими типами кондиционеров и возможность адаптации к низким температурам уличного воздуха [5, С. 38-42]. Однако, недостатком сплит-систем является их относительно невысокая мощность. Тем не менее, для охлаждения воздуха в небольших ЦОД сплит-системы обладают достаточной эффективностью и функциональностью.

3. Приточная вентиляция (применима в зимний период). В data-центрах и серверных помещениях применяются две основные схемы циркуляции воздуха: «сверху вниз» и «снизу вверх» (рис.2).

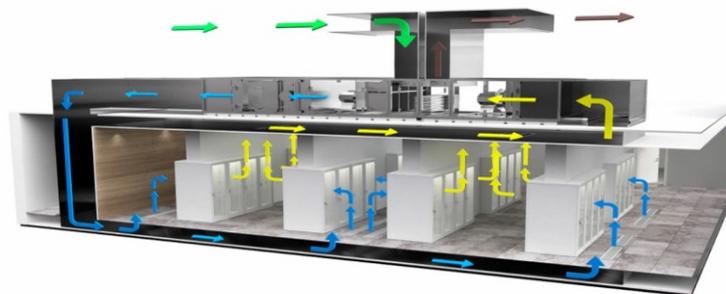


Рис. 2. Принцип работы приточной вентиляции
Fig. 2. Operating principle of supply ventilation

Первая схема эффективна при тепловых нагрузках до 400 Вт/м² площади пола, в то время как вторая предполагает равномерное удаление избытков тепла в пропорции «35-45% снизу»/«65-55% сверху» [6, С. 94-103]. Для обеспечения правильной вентиляции в серверных комнатах используются специальные технические решения, такие как перфорированный технический пол или напольные воздухораспределители вентиляционной системы. Контроль параметров вентиляции осуществляется с помощью регуляторов расхода воздуха [7, С. 36-43]. Регулярные проверки состояния всех элементов оборудования, таких как герметичность труб охлаждения и состояние фильтров, необходимы для обеспечения правильной работы системы. Для серверных комнат рекомендуется двухступенчатая система фильтрации воздуха с использованием фильтров EU4—EU5 для предварительной очистки и картриджей EU9—EU10 для более тонкой фильтрации.

Важно поддерживать абсолютную герметичность трубопровода между фильтром и серверной комнатой и обеспечить удобный доступ для обслуживания [8, С. 12-15]. Размер серверных помещений влияет на выбор оборудования. Для небольших серверных с низкой тепловой мощностью до 180 Вт/м² допустимо применение сплит-кондиционеров. Важно разделять зоны холодного и горячего воздуха в Data-центрах и обеспечивать точное контролирование

температуры [9, С. 62-66]. Профессиональные узкоспециализированные компании рекомендуются для подбора оборудования и расчета вентиляции в серверных помещениях. Данная система имеет название «Free-Cooling» и представляет собой наборную приточную вентиляционную установку с заслонками, с помощью которых регулируется поток входящего воздуха. Вентиляция обычно работает зимой, а летом включают сплит-систему [10, С. 128-134]. Преимущества «Free-Cooling»: экономичность; простое устройство; большой ресурс. Система охлаждения дата-центров «Free-Cooling» имеет ограничения по монтажу. Не во всех помещениях можно организовать естественный приток [11, С. 166-169].

4. Жидкостные системы охлаждения. Охлаждение серверов с помощью систем жидкостного охлаждения представляет собой эффективный и инновационный подход для поддержания оптимальной температуры работы оборудования. Рассмотрим, как это происходит (рис.3).

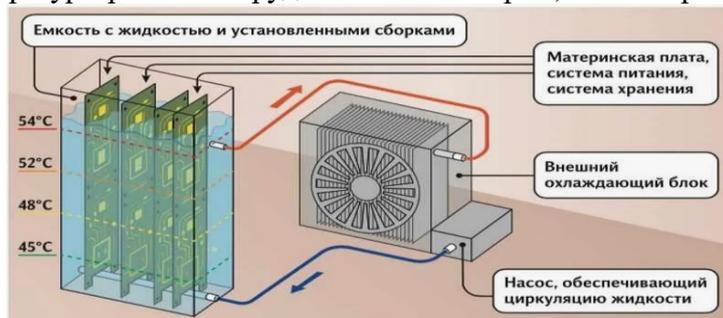


Рис. 3. Принцип работы системы жидкостного охлаждения для серверного оборудования

Fig. 3. Operating principle of a liquid cooling system for a server equipment

Система жидкостного охлаждения для серверов включает в себя циркуляцию специальной охлаждающей жидкости через трубопроводы, которые прокладываются вблизи серверов или даже непосредственно на них. Жидкость поглощает тепло, выделяемое серверами в процессе работы, и транспортирует его к холодильному агрегату для дальнейшего охлаждения [12, С. 280-288]. Жидкость может циркулировать по специальным каналам или трубкам, расположенным на поверхности серверов или внутри них, чтобы эффективно охладить оборудование. После поглощения тепла жидкость направляется к радиаторам или теплообменникам, где происходит отдача тепла в окружающую среду.

Этот процесс обеспечивает эффективное охлаждение серверов, предотвращая перегрев и обеспечивая оптимальные условия работы оборудования [13, С. 147-149]. Системы жидкостного охлаждения также позволяют точно контролировать температуру внутри серверных помещений, что особенно важно для обеспечения стабильной работы чувствительного оборудования. Кроме того, жидкостное охлаждение обладает высокой энергоэффективностью, поскольку жидкость может эффективно поглощать и отводить тепло, что может привести к снижению энергозатрат на охлаждение серверов [14, С. 58-66]. Такой подход также способствует снижению уровня шума в серверных помещениях, создавая более комфортные условия работы для персонала.

В целом, системы жидкостного охлаждения представляют собой современное и эффективное решение для охлаждения серверов, обеспечивая оптимальные условия работы и повышенную надежность оборудования.

5. Климатическая техника на хладоносителе. Климатическая техника на холодоносителе является важным компонентом систем охлаждения, широко применяемым в различных областях, включая серверные помещения, data-центры, промышленные объекты и офисные здания. Эта технология основана на использовании специального холодоносителя, который циркулирует по системе для охлаждения воздуха и оборудования [15, С. 173-177]. Основным принципом работы климатической техники на холодоносителе заключается в циркуляции холодоносителя через компрессор, конденсатор, испаритель и расширительный клапан (рис. 4). Компрессор сжимает холодоноситель, повышая его давление и температуру, после чего он поступает в конденсатор, где происходит отдача тепла и конденсация холодоносителя, затем

охлажденный холодоноситель проходит через испаритель, где поглощает тепло из окружающего воздуха или оборудования, испаряется и возвращается в компрессор для запуска нового цикла [16].

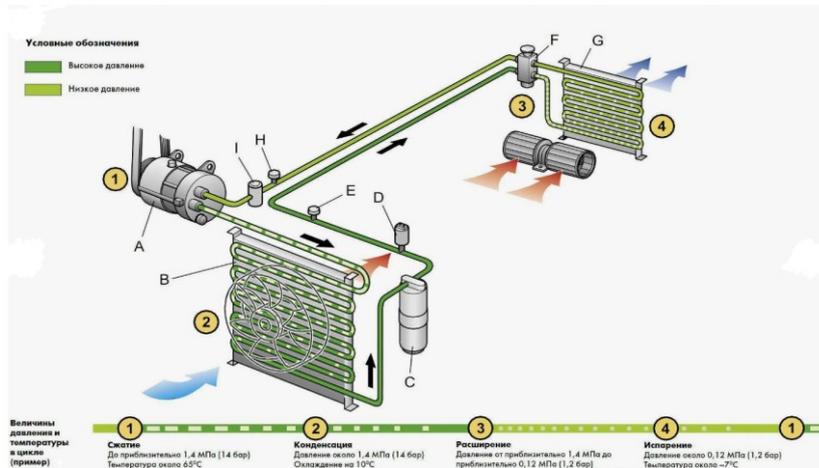


Рис. 4. Принцип охлаждения с помощью хладагента

Fig. 4. Principle of cooling using coolant

Преимущества климатической техники на холодоносителе включают высокую эффективность охлаждения, возможность точного контроля температуры и влажности, а также надежность и долговечность работы системы. Кроме того, использование холодоносителя позволяет создать равномерное и стабильное охлаждение в помещении без создания сквозняков или перепадов температуры [17, С. 23-26]. Однако, для эффективной работы системы на холодоносителе необходимо регулярное техническое обслуживание, контроль уровня холодоносителя, проверка герметичности системы и чистка фильтров. Также важно учитывать особенности выбора холодоносителя, его экологическую безопасность и соответствие стандартам энергоэффективности [18, С. 54-62].

Таким образом, климатическая техника на холодоносителе представляет собой эффективное и надежное решение для охлаждения помещений различного назначения, обеспечивая комфортные условия работы и сохранность оборудования [19, С. 110-115]

Вывод. Исходя из проведенного исследования, посвященного методам охлаждения серверного оборудования, можно сделать следующие ключевые выводы:

Во-первых, эффективное охлаждение серверного оборудования является критически важным для обеспечения стабильной работы и надежности системы. Высокие температуры в серверных помещениях могут привести к перегреву оборудования, что может вызвать снижение производительности и даже повреждение компонентов.

Во-вторых, существует множество различных методов охлаждения, включая воздушное охлаждение, жидкостное охлаждение и другие инновационные решения. Выбор оптимального метода охлаждения должен учитывать специфику серверного оборудования, тепловые нагрузки, размер помещения и другие факторы [20 С. 243-255].

В-третьих, исследование подтверждает, что качество охлаждающих систем напрямую влияет на эффективность работы серверного оборудования. Высококачественные системы охлаждения обеспечивают стабильную температуру и надежную работу серверов даже при высоких нагрузках.

Для эффективного охлаждения серверного оборудования рекомендуется использовать современные и надежные системы охлаждения, такие как жидкостное охлаждение, которое обладает высокой эффективностью, способностью поддерживать низкие температуры и предотвращать перегрев. Важно также уделить внимание правильной установке, обслуживанию и выбору оптимальной системы охлаждения в соответствии с потребностями и характеристиками серверного оборудования.

Библиографический список:

1. Полухин А.Т., Радачинская А.А. Анализ и разработка интеллектуального алгоритма охлаждения серверного помещения и пост использование паразитного тепла//Достижения вузовской науки. 2016. № 23. С. 131-135.

2. Сонич В.Ф., Бурков А.И. К вопросу о применении прецизионных кондиционеров в Пермском крае//Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. 2013. № 2. С. 107-115.
3. Глушков С.С. Энергосбережение и охлаждение в "ЦОД"//Научно-исследовательский центр "Technical Innovations". 2023. № 19. С. 192-196.
4. Комаров Е.Г., Лозовецкий В.В., Лебедев В.В., Черкина В.М. Моделирование системы автономной теплофикации при трансформации тепловой энергии, образующейся в серверных станциях//Лесной вестник. Forestry Bulletin. 2021. Т. 25. № 1. С. 130-139.
5. Полев И.Г., Сергеев А.И. Комбинированная система по мониторингу и регулированию температуры в серверном помещении//Интеграционные процессы в науке в современных условиях. Сб. статей Международной научно-практической конференции. Ответ. редактор: Сукиасян А.А. 2016. С. 38-42.
6. Жилкина Н.В. Планирование инфраструктуры ЦОД//Вестник связи 2006. № 11. С. 94-103.
7. Арбатский А.А., Глазов В.С. Обеспечение охлаждения в дата-центре сверхвысокой загрузки//Вестник Московского энергетического института. 2018. № 4. С. 36-43.
8. Ронжин П.Л., Мартынюк А.В. Системы кондиционирования с внутренним дублированием для дата-центров// Сети и системы связи 2008. № 14. С. 12-15.
9. Ахкозов В.В. Определение параметров объекта в системе приточной вентиляции с помощью математического моделирования//Инновационные перспективы Донбасса. Материалы междунаучно-практической конференции. Донецкий национальный технический университет. 2015. С. 62-66.
10. Еремкин А.И., Фильчакина И.Н. Воздухораспределитель для равномерной раздачи приточного воздуха через оппозитные щели в системах вытесняющей вентиляции//Региональная архитектура и строительство. 2011. № 2 С. 128-134.
11. Палеев Д.Ю., Киселев Ю.Е., Козлов В.И. Приточная вентиляция - проблемы и перспективы//Безопасность жизнедеятельности предприятий в промышленно развитых регионах. Материалы X Международной научно-практической конференции. 2013. С. 166-169.
12. Ахмедов Д.Ш., Елубаев С.А., Абдолдина Ф.Н. Применение системы жидкостного охлаждения в персональной гибридной вычислительной системе на базе графических процессоров// Научный сервис в сети Интернет: многообразие суперкомпьютерных миров. Труды Межд. суперкомпьютерной конференции. РАН. Суперкомпьютерный консорциум университетов России. 2014. С. 280-288.
13. Кондурцова Т.М. Двухфазная система жидкостного охлаждения серверов// Перспективные направления развития отечественных информационных технологий. Материалы III межрегиональной научно-практической конференции. Научный редактор Б.В. Соколов. 2017. С. 147-149.
14. Гаврилова О.А., Андреев А.И., Семенов А.Е., Чанчиков В.А. Экономическая эффективность использования полупроводникового охлаждения компьютерной техники//Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Экономика. 2023. № 4. С. 58-66.
15. Ворончихин С.Г., Помыткин В.А., Земцов М.А., Флакман А.Л. Определение влияния турбулизатора в теплообменнике на термическое сопротивление системы водяного охлаждения микрочипов//Научное обозрение. 2015. № 21. С. 173-177.
16. Ивашко Е.Е. Разработка математических моделей и информационных систем для повышения энергетической эффективности вычислительных кластеров и центров обработки данных с использованием прогнозирования нагрузки//НИР: грант № 13-07-98801. РФФИ. 2013.
17. Юлдашев А.Р., Морева Ю.А. Применение вычислительных систем с иммерсионным охлаждением в качестве дополнительного источника тепла для отопления помещений различного назначения //Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. 2023. Т. 14. № 2. С. 23-26.
18. Пискун Г.А., Алексеев В.Ф., Беликов А.Н., Рыбаков Д.Г. Моделирование отведения тепловой энергии от процессоров при помощи кулеров воздушного охлаждения//Доклады Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. 2023. Т. 21. № 4. С. 54-62.
19. Свиридов А.Н., Демкин В.И. Анализ методов повышения энергоэффективности центров обработки данных//Современные наукоемкие технологии. 2022. № 2 С. 110-115.
20. Шарун К.В., Баранова А.В. Разработка блока контроля температуры системы охлаждения серверов модульного типа//Перспективные технологии в средствах передачи информации. Материалы 14-ой международной научно-технической конференции. Владимир, 2021. С. 253-255.

References:

1. Polukhin A.T., Radachinskaya A.A. Analysis and development of an intelligent cooling algorithm for server rooms and post-use of waste heat. *Achievements of university science*. 2016; 23: 131-135. (In Russ)
2. Sonich V.F., Burkov A.I. On the application of precision air conditioners in the Perm region. *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Construction and Architecture*. 2013;2:107-115. (In Russ)
3. Glushkov S.S. Energy conservation and cooling in "DPC". *Scientific Research Center "Technical Innovations"*. 2023;19:192-196. (In Russ)

4. Komarov E.G., Lozovetsky V.V., Lebedev V.V., Cherkina V.M. Modeling of the autonomous heating system during the transformation of thermal energy generated in server stations. *Forestry Bulletin*. 2021;(25): 1:130-139. (In Russ)
5. Polev I.G., Sergeev A.I. Combined system for monitoring and regulating the temperature in a server room. Integration processes in science in modern conditions. Collection of articles of the International scientific-practical conference. Responsible editor: A. A. Sukiasyan. 2016; 38-42. (In Russ)
6. Zhilkina N.V. Planning of data center infrastructure. *Communication Bulletin* 2006; 11: 94-103. (In Russ)
7. Arbatsky A.A., Glazov V.S. Ensuring cooling in a high-load data center. *Bulletin of the Moscow Power Engineering Institute*. 2018;4:36-43. (In Russ)
8. Ronzhin P.L., Martynyuk A.V. Air conditioning systems with internal redundancy for data centers. *Networks and Communication Systems* 2008; 14: 12-15. (In Russ)
9. Akkozov V.V. Determination of object parameters in the supply ventilation system using mathematical modeling. Innovative perspectives of Donbass. Materials of the International scientific-practical conference. Donetsk National Technical University. 2015; 62-66.(In Russ)
10. Eremkin A.I., Filchakina I.N. Air distributor for uniform distribution of supply air through opposing slots in displacement ventilation systems. *Regional Architecture and Construction*. 2011;2:128-134. (In Russ)
11. Paleev D.Y., Kiselev Y.E., Kozlov V.I. Supply ventilation - problems and prospects. In the collection: Occupational safety of enterprises in industrially developed regions. Materials of the X International scientific-practical conference. 2013;166-169.(In Russ)
12. Akhmedov D.S., Elubaev S.A., Abdoldina F.N. Application of liquid cooling system in a personal hybrid computing system based on graphics processors. Scientific service on the Internet: diversity of supercomputer worlds. Proceedings of the International Supercomputer Conference. RAS. 2014; 280-288. (In Russ)
13. Kondurtsova T.M. Two-phase liquid cooling system for servers. In the collection: Promising directions for the development of domestic information technologies. Materials of the III interregional scientific and practical conference. Scientific editor B.V. Sokolov. 2017; 147-149. (In Russ)
14. Gavrilova O.A., Andreev A.I., Semenov A.E., Chanchikov V.A. Economic efficiency of using semiconductor cooling for computer equipment. *Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: Economics*. 2023; 4: 58-66. (In Russ)
15. Voronchikhin S.G., Pomytkin V.A., Zemtsov M.A., Flaxman A.L. Determining the influence of a turbulator in a heat exchanger on the thermal resistance of a water cooling system for microchips. *Scientific Review*. 2015; 2: 173-177. (In Russ)
16. Ivashko E.E. Development of mathematical models and information systems to increase the energy efficiency of computing clusters and data processing centers using load forecasting. *Research project: grant No. 13-07-98801. RFBR*. 2013. (In Russ)
17. Yuldashev A.R., Moreva Y.A. Application of computing systems with immersion cooling as an additional source of heat for heating premises of various purposes. *Current Issues in Modern Science, Technology and Education*. 2023;14(2):23-26. (In Russ)
18. Piskun G.A., Alexeev V.F., Belikov A.N., Rybakov D.G. Modeling of heat dissipation from processors using air cooling coolers. *Reports of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics*. 2023; 21(4):54-62.
19. Sviridov A.N., Demkin V.I. Analysis of methods for increasing energy efficiency of data processing centers. *Modern hightech technologies*. 2022; 2:110-115. (In Russ)
20. Sharun K.V., Baranova A.V. Development of a temperature control unit for a modular type server cooling system. Prospective technologies in information transmission means. Materials of the 14th International Scientific and Technical Conference. Vladimir, 2021; 253-255. (In Russ)

Сведения об авторах:

Страшко Егор Игоревич, студент, кафедра технологического оборудования и систем жизнеобеспечения; tukann.tukann@mail.ru

Шорсткий Иван Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры технологического оборудования и систем жизнеобеспечения; thegector@mail.ru

Жлобо Руслан Андреевич, старший преподаватель кафедры технологического оборудования и систем жизнеобеспечения; rzhlobo@bk.ru

Information about authors:

Egor I. Strashko, Student, Department of Technological Equipment and Life Support Systems; tukann.tukann@mail.ru

Ivan A. Shortsky, Cand. Sci. (Eng), Assoc. Prof., Department of Technological Equipment and Life Support Systems; thegector@mail.ru

Ruslan A. Zhlobo, Senior Lecturer, Department of Technological Equipment and Life Support Systems; rzhlobo@bk.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 03.07.2024.

Одобрена после рецензирования/ Revised 29.07.2024.

Принята в печать/Accepted for publication 29.07.2024.

Категорирование объектов критической информационной инфраструктуры учреждения высшего образования

Е.В. Бурькова, А.А. Рычкова, Л.А. Гриценко

Оренбургский государственный университет,
460018, г. Оренбург, просп. Победы, д. 13, Россия

Резюме. Цель. В настоящее время актуализируется задача обеспечения безопасности национальных информационных ресурсов России как важное направление политики государства в информационной сфере. Целью исследования является описание методики определения критичности процессов в научно-исследовательской деятельности высшего образовательного учреждения для решения вопроса присвоения ему категории критической информационной инфраструктуры и в соответствии с этой категорией - обеспечение требований к системе защиты информации. **Метод.** В качестве метода решения поставленной задачи используется метод экспертных оценок, моделирование бизнес-процессов BPMN. **Результат.** Представлен обзор подходов к категорированию объектов критической информационной инфраструктуры научной деятельности учреждения высшего образования. Проведен анализ и сопоставление нормативных документов регуляторов, их адаптация для сферы науки, определены основные этапы проведения категорирования, локальные нормативные документы, позволяющие проводить категорирование в соответствии с требованиями нормативно-правовой базы. Для проведения процесса категорирования вуза разработана схема этапов категорирования, рассмотрен регламент анализа объектов организации на предмет выявления критичности с последующим присвоением категории значимости или отказа от категории. **Вывод.** Научная деятельность учреждения высшего образования подлежит анализу на выявление критических процессов, инвентаризации объектов с выявлением возможных последствий в результате реализации угроз безопасности, определения субъектов и объектов критической информационной инфраструктуры, оценки категории значимости. Для повышения достоверности полученных результатов разработан регламент работы специальной комиссии по категорированию, проекты локальных документов по инвентаризации объектов и формализации процессов.

Ключевые слова: категорирование, объектов КИИ, этапы категорирования, метод моделирования бизнес-процессов

Для цитирования: Е.В. Бурькова, А.А. Рычкова, Л.А. Гриценко. Категорирование объектов критической информационной инфраструктуры учреждения высшего образования. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2024; 51(3):42-53. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-3-42-53.

Categorization of objects of critical information infrastructure of higher education institutions

E.V. Burkova, A.A. Rychkova, L.A. Gritsenko

Orenburg State University,
13 Pobeda Ave., Orenburg 460018, Russia

Abstract. Objective. Currently, the task of ensuring the security of Russia's national information resources is being updated as an important area of state policy in the information sphere. The purpose of the article is to describe a methodology for determining the criticality of processes in the research activities of a higher educational institution in order to solve the issue of assigning it the category of critical information infrastructure and, in accordance with this category, ensuring the requirements for the information security system. **Method.** The method

of expert assessments and BPMN business process modeling are used. **Result.** An overview of approaches to categorizing objects of critical information infrastructure of scientific activity of higher education institutions is presented. The analysis and comparison of regulatory documents of regulators, their adaptation for the field of science, the main stages of categorization, local regulatory documents allowing categorization in accordance with the requirements of the regulatory framework are determined. To carry out the categorization process of the university, a scheme of categorization stages has been developed, the rules of analysis of the organization's objects for the purpose of identifying criticality with subsequent assignment of a category of significance or rejection of a category have been considered. **Conclusion.** The scientific activity of a higher education institution is subject to analysis to identify critical processes, inventory of objects with identification of possible consequences as a result of the implementation of security threats, identification of subjects and objects of critical information infrastructure, assessment of the category of significance. To increase the reliability of the results obtained, the rules of procedure of the special commission on categorization, drafts of local documents on the inventory of objects and the formalization of processes have been developed.

Keywords: categorization of objects of critical information infrastructure in the field of science, stages of categorization, business process modeling method, BPMN.

For citation: E.V. Burkova, A.A. Rychkova, L.A. Gritsenko. Categorization of objects of critical information infrastructure of higher education institutions. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2024; 51(3):42-53 DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-3-42-53

Введение. Обеспечение непрерывного функционирования объектов критической информационной инфраструктуры в современных условиях возрастающего количества и опасности кибератак становится важной и трудоемкой задачей. По данным компании Cortel типовые цели и векторы атак направлены на серверы и сетевую инфраструктуру организации (рис. 1.)

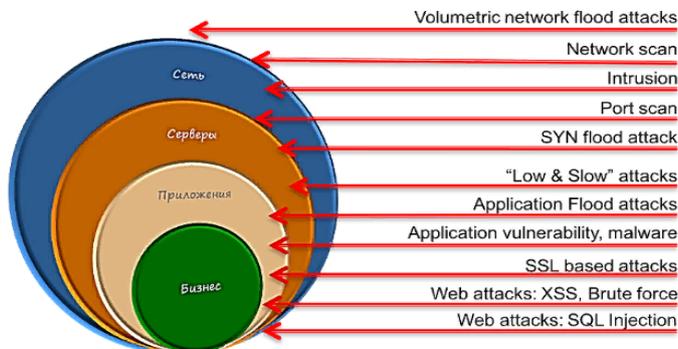


Рис. 1. Типовые цели и векторы атак
Fig. 1. Typical targets and attack vectors

Типичные уязвимости: слабо защищенные и низкопроизводительные маршрутизаторы и коммутаторы; DNS-серверы используют для перенаправления трафика и отказа в обслуживании критичных сервисов; серверы аутентификации; серверы приложений перегружают запросами для снижения производительности и отказа в обслуживании; BGP Hijacking (хищение BGP-маршрутов, используют для перехвата и хищения данных, либо для блокирования целевого ресурса). Ежедневно появляются новые «мишени».

Во II квартале 2023 года обнаружили более 7,5 тыс. уязвимостей, что на 7% больше, чем в начале года. Эксплуатируют и старые, поскольку некоторые системы остаются не обновленными [1]. Последствия реализации атак могут быть значительными: утечка персональных данных, приостановление предоставления образовательных услуг, нарушение работы сети организации, размещение на сайте организации компрометирующих записей, носящих противозаконный характер т.д. В конечном итоге организация может

понести финансовые и репутационные потери, поэтому необходима комплексная система защиты информации.

Постановка задачи. В качестве исследуемой организации мы рассматриваем учебное заведение высшего образования, государственный университет. В федеральном законе от 26.07.2017 г. № 187-ФЗ «О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации» определены сферы экономики, для субъектов которых необходимо провести категорирование КИИ и реализовать соответствующую защиту. Правила категорирования КИИ устанавливаются Постановлением Правительства РФ от 8 февраля 2018 г. № 127 «Об утверждении Правил категорирования объектов критической информационной инфраструктуры Российской Федерации, а также перечня показателей критериев значимости объектов критической информационной инфраструктуры Российской Федерации и их значений». Необходимо отметить, что в процессе категорирования объектов учитываются и информационные системы персональных данных, которые принадлежат субъекту КИИ, и должна быть реализована защита этих систем на основании требований законодательства России [2].

Сфера образования не входит в этот перечень, однако высшие учебные заведения осуществляют научную деятельность, следовательно, могут иметь в своем распоряжении объекты КИИ: информационные системы, информационно-телекоммуникационные сети, автоматизированные системы управления субъектов критической информационной инфраструктуры. Научно-исследовательская деятельность университета содержит следующие компоненты: интеграция науки и образования, реализация взаимодействия университета с научными учреждениями Российской Академии наук; научные исследования в области естественных и технических наук; участие ученых вуза в федеральных целевых программах, конкурсах и грантах, объявленных государственными научными фондами; развитие партнерства с предприятиями и другими хозяйствующими субъектами региона. Научные подразделения университета оснащены компьютерной техникой, имеют выход в локальную и глобальную сети, в них созданы база данных проводимых исследований, следовательно, реализуется множество информационных процессов, которые могут быть критичными и встает вопрос присвоения университету категории КИИ [3].

Задача категорирования объектов КИИ рассматривалась многими учеными. В статье [3] представлено содержание этапов процесса категорирования объектов КИИ организации сферы здравоохранения, а также представлен пример определения критичных процессов в конкретной организации.

В научной работе [4] проведен обзор существующих отечественных и зарубежных методик, приведена методика определения критических процессов предприятия в сфере химической промышленности. В статье [5] рассматривается методика оценки защищенности автоматизированной системы управления критической информационной инфраструктуры АСУ ТП от DDoS-атак на основе имитационного моделирования методом Монте-Карло.

Вопросы категорирования высшего учебного заведения как Вуз как субъекта законодательства о безопасности КИИ, рассматривались в работах [6, 19-20]. В статье [6] автор провел анализ научной деятельности вуза, считает, что основой процесса категорирования объектов КИИ является анализ уязвимостей и актуальных угроз, которые могут привести к значительным негативным последствиям. В статье приведен алгоритм действий по созданию перечней потенциальных уязвимостей и угроз, представлены применимые показатели критериев значимости объектов КИИ вуза.

Многие методики категорирования объектов КИИ базируются на основании экспертных данных, которые подвергаются дальнейшему анализу, процесс осложняется необходимостью учета взаимосвязи между объектами и их процессами, имеющими влияние на величину рисков, возникновение множественных сбоях из-за компьютерных атак [7-10, 16, 21]. Нами была разработана схема этапов категорирования объектов КИИ в сфере науки, представленная на рис.2.

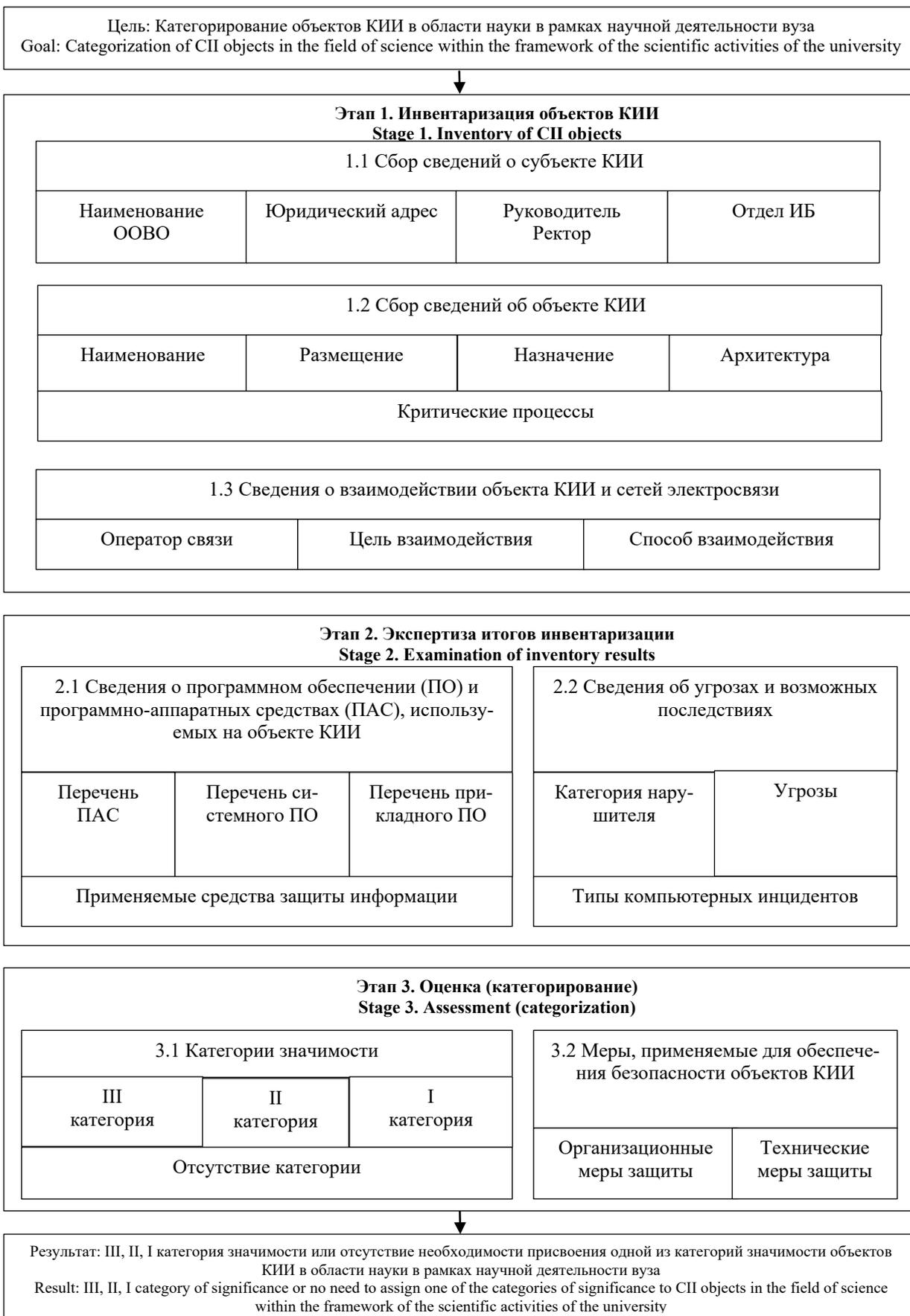


Рис. 2. Схема этапов категорирования объектов КИИ в сфере науки
Fig. 2. Scheme of stages of categorization of CII objects in the field of Science

Порядок категорирования объектов КИИ представлен в Постановлении Правительства № 127 и включает в себя:

1. Инвентаризацию объектов КИИ, таких как автоматизированные информационные системы управления, используемых при проведении научно-исследовательских работ с целью определения их критичности.

2. Экспертизу итогов инвентаризации на уровне специально созданной комиссии и утверждение перечня объектов КИИ.

3. Оценка - категорирование выделенных объектов КИИ с целью установления их значений показателей значимости и присвоение каждому из них одной из соответствующей категории либо отказ от присвоения.

В конечном итоге целью является создание адекватной системы информационной безопасности, снижение рисков, обеспечение бесперебойной работы инфраструктуры университета. Инвентаризация объектов КИИ в рамках научной деятельности университета является важным этапом процесса категорирования. В результате выполнения этого этапа формируется список всех информационных систем и информационно-телекоммуникационных сетей, их описание и указание месторасположения, принадлежность к субъекту КИИ, вовлеченность в деятельность научных организаций университета.

Не менее важным является этап анализа угроз информационной безопасности, категорий нарушителей, выявление инцидентов безопасности. Всестороннее и системное изучение угроз безопасности, в том числе угроз несанкционированного доступа на объектах КИИ, является сложной задачей. Для решения данной задачи используют количественные методы оценки на основе вероятностного подхода, а именно метрики вероятности проявления угроз [11].

Особое внимание необходимо уделять требованиям к структурным подразделениям обеспечения безопасности значимых объектов КИИ. Риск ущерба для субъектов КИИ от компьютерных атак на критические процессы имеет тяжелые последствия, начиная от потери репутации и до приостановления работы организации [12].

На основе экспертных данных, полученных в результате обследования информационной структуры университета, ставится задача определения критических процессов в научной деятельности, на основе которых может быть сделано заключение о необходимости присвоения университету категории КИИ. Сфера науки в ФЗ-187 недостаточно проработана и требует дополнительных уточнений, что конкретно относится к сфере науки. Если использовать классический подход, то необходимо проверить Общероссийский классификатор видов экономической деятельности (ОКВЭД) в документах организации. В большинстве университетов присутствует номер 72.19 и/или 72.20, что относится к научным исследованиям. Исходя из данных ОКВЭД университет является субъектом критической информационной инфраструктуры (далее – КИИ). И ставится задача определить критические процессы и значимость объектов КИИ.

Методы исследования. Реализация научной деятельности подразумевает использование информационных технологий и телекоммуникационных сетей. Данный фактор осложняет выявление отдельных управленческих, технологических, производственных, финансово-экономических и (или) иных процессов с целью анализа их на предмет критичности [13].

Для выполнения всех этапов категорирования применяют методы экспертных оценок, для анализа процессов научной деятельности применяют методы моделирования бизнес-процессов. В нашем исследовании рассмотрен метод моделирования бизнес-процессов BPMN.

В качестве объекта исследования рассмотрим научную деятельность Оренбургского государственного университета. В рамках выполнения функций (полномочий) или осуществления научно-исследовательской деятельности в университете функционирует Управление научной и инновационной деятельностью (УНИД), которое взаимодействует со всеми научно-исследовательскими институтами (НИИ), лабораториями и другими под-

разделениями науки в университете. На основании данных, полученных от УНИД можно сформировать перечень НИИ, центров коллективного пользования, лабораторий и центров вуза, в которых необходимо провести инвентаризацию ресурсов и определить процессы для дальнейшего анализа на критичность [14].

На рис. 3 представлен порядок формирования перечня критических процессов в области науки в нотации BPMN.

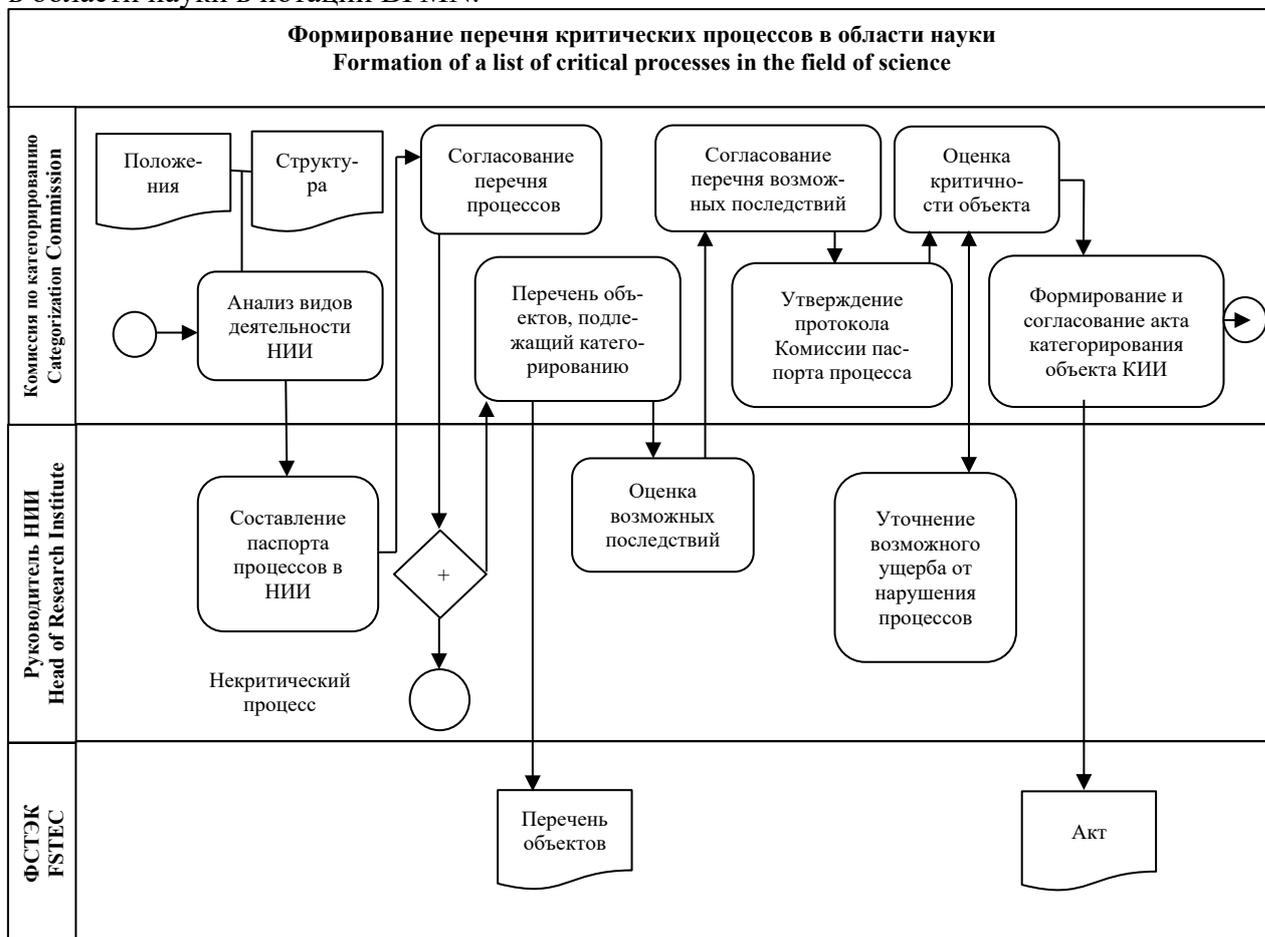


Рис. 3. Порядок формирования перечня процессов в области науки
 Fig. 3. The procedure for creating a list of processes in the field of science

Обсуждение результатов. На первом этапе был проведен анализ деятельности НИИ, используемых информационных систем, испытательного оборудования, программного обеспечения с целью выяснения специфики проводимых работ и влияния результатов работ на возникновение негативных последствий [15].

Сложность возникает при выявлении самих критических процессов, так как в комиссию необходимо включать представителей НИИ. Поэтому для унификации каждого процесса в области науки был подготовлен регламент для описания процессов в области науки, в ходе которого формируется паспорт процесса научной деятельности, определяются задействованные объекты, пример заполнения синтетическими данными представлен в табл. 1.

Процесс научного исследования в ОГУ кроме основного процесса исследования и разработки включает в себя еще сопутствующие и обеспечивающие, а также управляющие процессы, такие как бухгалтерское сопровождение, закупки, кадровое обеспечение, выпуск приказов и распоряжений и т.д.

С целью сокращения трудозатрат на описание обеспечивающих процессов разработан и представлен в регламенте типовой процесс. Если описываемый процесс существенно отличается от типового, требуется внесение изменений в схему процесса.

Таблица 1. Описание процесса научного исследования (пример)
Table 1. Description of the scientific research process (example)

Наименование процесса исследования Name of the research process		Подпроцесс(ы), в котором(ых) используется оборудование процесса Sub-process(es) in which process equipment is used
Разработка комплексной системы оценки устойчивости моделей машинного обучения. Грант РФФИ № 123		Процесс экспериментальных исследований
Контролируемые параметры подпроцесса Controlled subprocess parameters		Метод измерения параметров подпроцесса Method for measuring subprocess parameters
- количество параметров обучающей модели - время расчета модели на оборудовании - точность предсказаний моделей - соответствие результатов эксперимента теоретическим результатам		Расчетные, сравнительные, экспертные
Бизнес-процесс верхнего уровня/Top level business process		
Научные исследования в НИИ ЦиНТ		
Вложенные процессы/ Nested Processes		
нет		
Задействованные Объекты (оборудование, информационные системы, сети, устройства, установки, программы) с инвентарным номером (при наличии) и степень влияния их отказа на весь процесс (низкая, средняя, высокая, краткое описание)/ Involved Objects		
сервер машинного обучения ASUS, инвентарный номер №111 – средняя, при отказе исследование нарушение сроков исполнения гранта, недостаточно публикаций по результатам; компьютеры инв. № 222 – низкая, продолжение работы на другом компьютере; маршрутизатор инв. № 333 – низкая, задействован только при первичном запуске модели, можно заменить на другой аналогичный; система хранения данных инв. №444 – средняя, при отказе будет снижена скорость расчетов модели; передатчик беспроводной многозонный инв. №2222– высокая, при отказе невозможно продолжение экспериментальных исследований; датчики беспроводные инв. № «б/н» - высокая, при отказе невозможно продолжение экспериментальных исследований; ПО Matlab 2008 – среднее, при отказе возможно использовать другие инструменты анализа.		
Текстовое описание подпроцесса и использования оборудования (и ПО) в нем Text description of the subprocess and the use of equipment (and software) in it		
Планирование эксперимента и подготовка наборов данных производится в ПО Keras (с открытым исходным кодом) на компьютерах инв. № 222 Экспериментальное исследование моделей проводится путем компьютерного моделирования на созданном программном обеспечении при использовании аппаратных ресурсов сервера инв. № 111 на ПО tensorflow (с открытым исходным кодом). При запуске модели через маршрутизатор инв. № 333 скачиваются данные с системы хранения данных инв. № 444, после чего запускается серия расчетов. Результаты помещаются обратно в систему хранения данных. Эксперимент на оборудовании проводится после помещения рассчитанных на модели параметров в передатчик беспроводной инв. № 2222, после чего с помощью датчиков беспроводных инв. № «б/н 222» снимаются показания. После этого производится сравнение выборок результатов. Сравнение результатов модельных и натуральных исследований производится в ПО Matlab 2008R на компьютерах инв. № 222		
Руководитель процесса исследования		с.н.с., к.т.н., доц. лаборатории ПнП НИИ ЦиНТ Иванов И.И.
Функции процесса Process functions		
№	Наименование функции	Исполнитель
1	Составление плана эксперимента	с.н.с. Петров П.П.
2	Выгрузка наборов данных	с.н.с. Петров П.П.
3	Тестирование наборов данных	с.н.с. Сидоров С.С.
4	Запуск прогона моделей	с.н.с. Сидоров С.С.
5	Сбор и анализ данных моделей	с.н.с. Петров П.П.
6	Запуск натурального эксперимента	с.н.с. Петров П.П.
7	Сбор и анализ данных натурального эксперимента	с.н.с. Иванов И.И.
Перечень регламентирующих документов List of regulatory documents		
№	Наименование документа	Источник документа
	отсутствует	
Перечень подразделений и должностей, участвующих в процессе List of departments and positions involved in the process		
Лаборатория ПнП НИИ ЦиНТ: с.н.с. Иванов И.И. с.н.с. Петров П.П.		

Далее необходимо заполнить Паспорт процесса в соответствии со следующим алгоритмом:

1. Заполнить поля с указанием названия исследований, руководителей, подразделений.
2. Описать оборудование, программное обеспечение, с указанием степени критичности влияния работоспособности на процесс исследования.
3. Описать сам процесс исследования с использованием этого оборудования (где, и в какой мере оно используется).
4. По каждому объекту заполнить по форме возможные последствия от компьютерных инцидентов (атак, взломов, заражений) по форме табл. 2.
5. При наличии хотя бы одного возможного инцидента в форме оценке, необходимо предоставить расчеты значения критериев значимости процесса научного исследования, указанного в Паспорте процесса.

В регламенте устанавливаются обязанности сотрудников управления научной и инновационной деятельностью, ответственных за научное исследование, отдела информационной безопасности.

Процессу описания должно быть подвергнуто каждое научное исследование, проводимое в ОГУ и затрагивающее Объекты (оборудование, информационные системы, сети, устройства, установки), в которых используются компьютерные системы управления, контроллеры с возможностью удаленного перепрограммирования или системы автоматизированного управления с возможностью внешнего воздействия.

Основным критерием необходимости описания процесса по данному Регламенту является наличие в составе процесса научного исследования Объектов (оборудования, устройств, установок), которые имеют какие-либо информационные системы, подключаются к сети (локальной или к Интернет), имеют в составе компьютер, взаимодействуют с другими информационными технологиями.

При описании процесса для каждого используемого Объекта (оборудования, информационной системы, сети, устройства, установки) требуется провести оценку возможных последствий от нарушения процесса (в том числе технологического) через информационные технологии (например от воздействия вируса или хакерской атаки) – выход из строя Объекта (например, из-за нештатных режимов работы или отключения защиты), кража закрытых или конфиденциальных данных, потеря данных, угроза возгорания, угроза жизни и здоровью людей, экологические риски.

В конце табл. 1 указываются сведения, участвующих в заполнении паспорта процесса, так как данный материал используется членами комиссии для проведения категорирования.

Исходя из наличия в научных процессах программного обеспечения и оборудования необходимо по ПП-127 составить перечень показателей критериев значимости, предварительно участникам научного процесса оценить информационные риски, заполнив следующую табл. 2.

Итоговая форма расчета значения критериев значимости процесса научного исследования представлена в табл. 3.

Сформировав, таким образом, паспорт процесса, коллегиально на комиссии с приглашенными руководителями научных процессов проходит оценка, является ли процесс критическим.

В рассматриваемом университете большая часть НИИ используют компьютеры автономно, не подключая их даже к локальной сети вуза, вся информация о грантах университета и их краткое описание является открытой информацией и представлена на сайте университета [15].

Таблица 2. Оценка возможных последствий (пример синтетических данных)
Table 2. Assessment of possible consequences (synthetic data example)

Объект/ значимость Object/ importance	Возможные последствия, связанные с инцидентами (взломами, атаками, сбоями) в сфере информационных технологий на оборудовании Possible consequences associated with incidents (break-ins, attacks, failures) in the field of information technology on equipment				
	Социальная значимость Social significance		Экономическая значимость Economic importance		Экологическая значимость Ecological significance
	Нештатный режим работы и, вследствие этого, поломки или физическое разрушение объекта	Угрозы жизни и здоровью людей при штатных режимах работы	Потеря (уничтожение), кража получаемых данных (в том числе через сеть)	Угрозы имуществу ОГУ (возгорание, затопление и т.д.)	Угрозы экологии (выбросы, сливы и т.д.)
сервер инв.№ 111	Нет	Нет	Да	Нет	Нет
маршрутизатор инв № 333	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет
система хранения данных инв № 444	Нет	Нет	Да	Нет	Нет
передатчик беспроводной многозонный инв №2222	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет
датчики беспроводные инв № «б/н»	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет
ПО Matlab	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет

Таблица 3. Итоговая обобщенная форма расчета значения критериев значимости процесса научного исследования
Table 3. Final generalized form for calculating the value of criteria for the significance of the scientific research process

Критерии значимости Significance criteria	Значение критерия Criterion value
Социальная значимость Social significance	Отсутствует Absent
Политическая значимость Political significance	Отсутствует Absent
Экономическая значимость Economic importance $\text{Ущерб} = \frac{\text{Потери вуза}}{\text{Бюджет РФ усредн.}} * 100\%$	Отсутствует Absent
Экологическая значимость Ecological significance	Отсутствует Absent
Значимость для обеспечения обороны страны, безопасности государства и правопорядка Significance for ensuring national defense, state security and law and order	Отсутствует Absent

На текущий момент критических процессов, которые могли бы попасть под критерии ПП-127 в вузе не было установлено. При появлении новых грантов, проектов или открытия новых НИИ и других подразделений в области науки, УНИД проводит уведомление комиссии по категорированию КИИ для проведения опроса, составления паспорта научного процесса и проведения оценки.

Проведенный обзор нормативно-правовых документов в сфере КИИ, методических разработок и подходов в области категорирования объектов критической информационной инфраструктуры учреждений высшего образования позволил определить этапы, формализовать процессы, определить всех участников:

- одним из видов деятельности высшего учебного заведения является научная деятельность, относящаяся к сферам субъектов КИИ;
- отсутствие в настоящий момент единых методических указаний по категорированию объектов КИИ в сфере науки и необходимость выполнения требований

регуляторов предписывает вузам разрабатывать локальные нормативные акты для проведения соответствующих процедур;

- в основе категорирования объектов КИИ лежит экспертный подход. В качестве экспертной комиссии выступают компетентные специалисты соответствующих научных направлений и специалисты информационной безопасности.

Вывод. Разработанный в Оренбургском государственном университете регламент описания процессов научных исследований соответствует требованиям Федерального закона № 187-ФЗ, включает методические рекомендации описания процессов в научной сфере, организацию работ с паспортами процессов, рекомендации подразделениям, занимающимся научной деятельностью.

Схема этапов категорирования, порядок формирования перечня процессов в области науки в высшем учебном заведении и регламент описания процессов являются методологической основой для дальнейшей работы по декомпозиции процессов теоретического и экспериментального исследований с помощью моделей IDEF0.

Входными данными для описания процессов научного исследования является информация о способах и методах проведения конкретных научных исследований, а также перечень оборудования (информационных систем, сетей, устройств, установок). Выходными данными является описание процесса в виде оценки возможных последствий от компьютерных инцидентов, а также (опционально) типовой процесса в нотации IDEF0.

Библиографический список:

1. Защита от DDoS в 2023: проблемы, опыт, лучшие практики URL: <https://blog.cortel.cloud/category/Informacionnaya-bezopasnost> (дата обращения 10.02.2024)
2. Козырева А.А., Тарасов Д.А. Современное состояние государственной политики в сфере информационной безопасности / Вестник Воронежского института МВД России. 2018; № 4. С. 243–247.
3. Бурькова Е.В., Рычкова А.А. Некоторые аспекты категорирования высшего учебного заведения как субъекта критической информационной инфраструктуры / Научно-технический вестник Поволжья. 2022. № 4. С. 207-209.
4. Голубев Д.А., Прохорова Д.И. Категорирование объектов критической информационной инфраструктуры сферы здравоохранения / В сборнике: Актуальные вопросы современной науки и образования. сборник статей VIII Международной научно-практической конференции. Пенза, 2021. С. 129-136.
5. Салкуцан А.А., Гавдан Г.П., Полуянов А.А. Методика определения критических процессов на объектах информационной инфраструктуры / Безопасность информационных технологий. 2020. Т. 27. № 2. С. 18-34.
6. Воеводин В.А., Черняев В.С., Буренок Д.С., Виноградов И.В. Методика оценки защищенности автоматизированной системы управления критической информационной инфраструктуры от DDoS-атак на основе имитационного моделирования методом Монте-Карло / Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023. № 50(1). С. 62-74.
7. Вавичкин А.Н., Горбатов В.С., Дураковский А.П., Чжен Д.А. К вопросу категорирования объектов критической информационной инфраструктуры высших учебных заведений / Безопасность информационных технологий. 2019. Т. 26. № 2. С. 44-57.
8. Фисун В.В. Методика оценки защищенности в интеллектуальной системе управления информационной безопасностью объектов критической информационной инфраструктуры/ Информационная безопасность - актуальная проблема современности. Совершенствование образовательных технологий подготовки специалистов в области информационной безопасности. 2019. № 2 (11). С. 43-50.
9. Краснов А.Е., Мосолов А.С., Феоктистова Н.А. Оценивание устойчивости критических информационных инфраструктур к угрозам информационной безопасности / Безопасность информационных технологий. 2021. Т. 28. № 1. С. 106-120.
10. Смирнов Е.В. Методика оценки политической значимости угроз объекту критической информационной инфраструктуры на примере объекта инфокоммуникаций / Экономика и качество систем связи. 2020. № 2 (16). С. 49-56.
11. Скрыль С.В., Ицкова А.А., Хасин Е.В. О возможности совершенствования процедур количественной оценки угроз несанкционированного доступа к информации объектов критической информационной инфраструктуры / Безопасность информационных технологий. 2023. Т. 30. № 4. С. 61-73.
12. Гавдан Г.П., Иваненко В.Г., Салкуцан А.А. Обеспечение безопасности значимых объектов критической информационной инфраструктуры / Безопасность информационных технологий. 2019. Т. 26. № 4. С. 69-82.
13. Абраменко Г.Т., Лансере Н.Н., Фадеев И.И. Анализ особенностей субъектов критической информационной инфраструктуры российской федерации, функционирующих в сфере науки. В сборнике: Актуальные

- проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2022). XI Международная научно-техническая и научно-методическая конференция. Санкт-Петербург, 2022. С. 49-54.
14. Методические рекомендации Категорирование объектов критической информационной инфраструктуры. ООО «СТЭП ЛОДЖИК». URL: <https://step.ru/news/?code=2046> (дата обращения 15.02.2024).
 15. Сайт Оренбургского государственного университета. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.osu.ru/doc/5419> - 15.02.2024 (дата обращения 02.02.2024).
 16. Харланов Р.Л. Правовые основы обеспечения безопасности критической информационной инфраструктуры в России / Современная наука: Актуальные проблемы теории и практики. Серия: Экономика и право, 2022. № 3-2. С. 98-103
 17. Котов А.А., Куринная В.С., Шлыков М.С. Алгоритм категорирования объектов критической информационной инфраструктуры / REDS: Телекоммуникационные устройства и системы, 2018. Т. 8. № 4. С.34-37
 18. Сидак А.А., Корниенко А.А., Глухова В.А. Категорирование и оценка значимости объектов критической информационной инфраструктуры железнодорожного транспорта / Двойные технологии, 2019. № 1 (86). С.88-93.
 19. Солдатов А.Ю., Солдатов Е.Ю., Скориков В.С. Вуз как объект критической информационной инфраструктуры / ИНТЕР ЭКСПО ГЕО СИБИРЬ, 2022. Т. 7. № 2. С. 93-96.
 20. Мазепин П.С., Гришин Н.А., Бочаров М.В. Подход к категорированию высших учебных заведений в рамках категорирования объектов критической информационной инфраструктуры / Инновации. Наука. Образование, 2021. № 34. С. 879-883.
 21. Заколдаев Д.А., Швед В.Г., Копырулина О.А. Автоматизация процессов категорирования объектов критической информационной инфраструктуры. Защита информации. Инсайд, 2021. № 3 (99). С. 37-43

References:

1. DDoS protection in 2023: problems, experience, best practices URL: <https://blog.cortel.cloud/category/Informaczionnaya-bezopasnost> (accessed 02/10/2024) (In Russ)
2. Kozyreva A.A., Tarasov D.A. The current state of state policy in the field of information security. *Herald of the Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia*. 2018; 4: 243-247. (In Russ)
3. Burkova E.V., Rychkova A.A. Some aspects of categorizing a higher educational institution as a subject of critical information infrastructure. *Scientific and Technical Bulletin of the Volga region*. 2022; 4:207-209. (In Russ)
4. Golubev D.A., Prokhorova D.I. Categorization of objects of critical information infrastructure in the healthcare sector. In the collection: Topical issues of modern science and education. collection of articles of the VIII International Scientific and Practical Conference. Penza, 2021;129-136. (In Russ)
5. Salkutsan A.A., Gavdan G.P., Poluyanov A.A. Methodology for determining critical processes at information infrastructure facilities. *Information technology security*. 2020; 27(2):18-34. (In Russ)
6. Voevodin V.A., Chernyaev V.S., Burenok D.S., Vinogradov I.V. Methodology for assessing the security of an automated control system of critical information infrastructure from DDoS attacks based on Monte Carlo simulation. *Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Sciences*. 2023; 50(1):62-74. (In Russ)
7. Vavichkin A.N., Gorbatov V.S., Durakovskiy A.P., Zheng D.A. On the issue of categorization of objects of critical information infrastructure of higher educational institutions. *Information technology security*. 2019; 26(2): 44-57. (In Russ)
8. Fisun V.V. Methodology for assessing security in an intelligent information security management system for critical information infrastructure facilities/ Information security is an urgent problem of our time. Improvement of educational technologies for training specialists in the field of information security. 2019;2 (11):43-50. (In Russ)
9. Krasnov A.E., Mosolov A.S., Feoktistova N.A. Assessment of the stability of critical information infrastructures to threats to information security. *Information technology security*. 2021; 28(1):106-120. (In Russ)
10. Smirnov E.V. Methodology for assessing the political significance of threats to the object of critical information infrastructure on the example of an infocommunication object. *Economics and quality of communication systems*. 2020;2 (16):49-56 (In Russ)
11. Skryl S.V., Itskova A.A., Khasin E.V. On the possibility of improving procedures for quantifying threats of unauthorized access to information of critical information infrastructure facilities. *Information Technology Security*. 2023;30(4):61-73 (In Russ)
12. Gavdan G.P., Ivanenko V.G., Salkutsan A.A. Ensuring the security of significant objects of critical information infrastructure. *Information technology security*. 2019; 26(4):69-82. (In Russ)
13. Abramenko G.T., Lancere N.N., Fadeev I.I. Analysis of the features of the subjects of the critical information infrastructure of the Russian Federation operating in the field of science. In the collection: Current problems of infotelecommunications in science and education (APINO 2022). XI International Scientific-technical and scientific-methodical Conference. St. Petersburg, 2022; 49-54 (In Russ)

14. Methodological recommendations Categorization of objects of critical information infrastructure. STEP LOGIC LLC. URL: <https://step.ru/news/?code=2046> (accessed 02/15/2024). (In Russ)
15. Website of Orenburg State University. [electronic resource]. URL: <http://www.osu.ru/doc/5419> - 02/15/2024 (accessed 02/02/2024). (In Russ)
16. Kharlanov R.L. The legal foundations of ensuring the security of critical information infrastructure in Russia. *Modern science: Actual problems of theory and practice. Series: Economics and Law*, 2022; 3-2:98-103 (In Russ)
17. Kotov A.A., Kurinnaya V.S., Shlykov M.S. Algorithm for categorizing objects of critical information infrastructure. *REDS: Telecommunication devices and systems*. 2018; 8(4):34-37 (In Russ)
18. Sidak A.A., Kornienko A.A., Glukhova V.A. Categorization and assessment of the importance of objects of critical information infrastructure of railway transport. *Dual technologies*. 2019; 1 (86):88-93. (In Russ)
19. Soldatov A.Yu., Soldatov E.Yu., Skorikov V.S. University as an object of critical information infrastructure. *INTER EXPO GEO SIBERIA*, 2022; 7(2): 93-96 (In Russ)
20. Mazepin P.S., Grishin N.A., Bocharov M.V. Approach to categorization of higher educational institutions within the framework of categorization of objects of critical information infrastructure. *Innovations. Science. Education*. 2021;34:879-883 (In Russ)
21. Zakoldaev D.A., Shved V.G., Kopyrulina O.A. Automation of categorization processes of objects of critical information infrastructure. *Information protection. Inside*, 2021; 3 (99):37-43 (In Russ)

Сведения об авторах:

Бурькова Елена Владимировна, кандидат педагогических наук, доцент, кафедра вычислительной техники и защиты информации; tulpan63@bk.ru

Рычкова Анастасия Александровна, кандидат педагогических наук, доцент, кафедра вычислительной техники и защиты информации; rnansy@yandex.ru; ORCID: 0000-0003-0734-5071

Гриценко Любовь Андреевна, ассистент, кафедра вычислительной техники и защиты информации; lubaizvekova@gmail.com

Information about authors:

Elena V. Burkova, Cand. Sci. (Pedagog.), Assoc. Prof., Department of Computer Technology and Information Security; tulpan63@bk.ru

Anastasia A. Rychkova, Cand. Sci. (Pedagog.), Assoc. Prof., Department of Computer Technology and Information Security; rnansy@yandex.ru; ORCID: 0000-0003-0734-5071

Lyubov A. Gritsenko, Assistant, Department of Computer Technology and Information Security; lubaizvekova@gmail.com

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 01.03.2024.

Одобрена после/рецензирования Revised 29.03.2024.

Принята в печать/ Accepted for publication 29.03.2024.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 004.942



DOI: 10.21822/2073-6185-2024-51-3-54-59

Оригинальная статья /Original article

Исследование методов моделирования предприятия массового обслуживания

Ш.М. Джафарова, С.М.Ахмедова, А.Г. Алиева

Сумгаитский государственный университет,
AZ5008, г.Сумгаит, ул. Баку, 1, 43-й квартал, Азербайджан

Резюме. Цель. Целью исследования является применение инструментов искусственного интеллекта для оптимизации и моделирования автоматизированной организации работы предприятия массового обслуживания. **Метод.** Исследование основано на применении сети Петри как инструмента моделирования, а также математических аппаратных средств, позволяющих реализовывать имитационные модели подсистем и проводить дополнительные исследования моделей искусственного интеллекта GPSS. **Результат.** Для обработки результатов процесса моделирования был использован метод сети Петри и разработан граф модели сетевой активности. Процесс моделирования, используемый с помощью приложения сети Петри, позволяет более четко описывать такие функции. Рассмотрены принципы моделирования систем на основе языка GPSS и сети Петри. **Вывод.** Целесообразно использовать языковые аппараты GPSS и сети Петри для информационного обеспечения деятельности организации массового обслуживания, моделирования структуры организации и информационных потоков.

Ключевые слова: искусственный интеллект; моделирование; сервисное предприятие, сеть Петри; граф-схема

Для цитирования: Ш.М. Джафарова, С.М. Ахмедова, А.Г. Алиева. Исследование методов моделирования предприятия массового обслуживания. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2024; 51(3):54-59. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-3-54-59

Research of methods of modeling of mass service enterprise

Sh.M. Jafarova, S.M. Akhmedova, A.G. Aliyeva

Sumgait State University,
1 Baku St., 43rd district, Sumqayit AZ5008, Azerbaijan

Abstract. Objective. The purpose of the study is to use artificial intelligence tools to optimize and model the automated organization of work at a mass service enterprise. **Method.** The research is based on the use of a Petri net as a modeling tool, as well as mathematical hardware that makes it possible to implement simulation models of subsystems and conduct additional research on GPSS artificial intelligence models. **Result.** To process the results of the modeling process, the Petri net modeling method was used and a network activity model graph was developed. The modeling process used with the Petri Net application allows such functions to be described more clearly. The principles of modeling systems based on the GPSS language and Petri nets are considered. **Conclusion.** It is advisable to use the language devices GPSS and SP, which provide information support for the activities of a mass service enterprise, modeling the structural organization and information flows.

Keywords: artificial intelligence, modeling, service enterprise, Petri net, graph-scheme

For citation: Sh.M. Jafarova, S.M. Akhmedova, A.G. Aliyeva. Research of methods of modeling of mass service enterprise. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2024; 51(3):54-59. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-3-54-59

Введение. Поскольку информационные технологии – постоянно развивающаяся сфера, все чаще включаются услуги, направленные на развитие этой сферы. Учитывая

плотность процесса обслуживания клиентов на предприятиях массового обслуживания (ПМО), применение средств искусственного интеллекта для оптимизации и моделирования автоматизированной организации их работы является одним из актуальных вопросов.

В настоящее время созданы новые информационные системы, позволяющие повысить качество государственных услуг за счет четкого управления документооборотом и потоками пользователей. В тоже время официализация и представление процессов государственной службы в виде информационных моделей позволяют выявить недостатки. Как правило, ПМО имеет значительные скрытые ресурсы для улучшения своей структуры и организации процесса обслуживания [1-4].

Постановка задачи. Существуют разные формы решения задачи, и одна из них – построение бизнеса предприятия, например, с помощью языка моделирования GPSS [3]. Решением этой проблемы является обеспечение правильного управления ресурсами в процессе обслуживания. Ресурсами здесь могут быть люди, оборудование или объекты, например служебные помещения. В целях повышения эффективности обслуживания людей на предприятиях сферы услуг создается модель информационного обеспечения управления ресурсами.

Методы исследования. Поскольку ПМО является большой организацией, то для эффективного анализа эффективности такой организации используется имитационное моделирование. Для изучения работы сервисных предприятий, анализа их эффективности и последующей оптимизации могут использоваться различные инструменты моделирования, среди которых выделяют язык GPSS (General Purpose Simulation System) [5-7]. Возможности моделирования этого языка обширны и для построения GPSS необходима модель структуры сервисного предприятия, исходя из нее определяются загруженность отдельных подразделений, наличие очередей, среднее время пребывания людей в системе.

По результатам отчета GPSS возможно оптимизировать работу предприятия массового обслуживания, то есть устранить очереди, перераспределить рабочий поток, улучшить график работы сотрудников и т.д.

В рассматриваемом примере создана имитационная модель предприятия с регистрацией и тремя приемными отделениями. Структура ПМО и схема взаимодействия с человеком показаны на рис. 1.

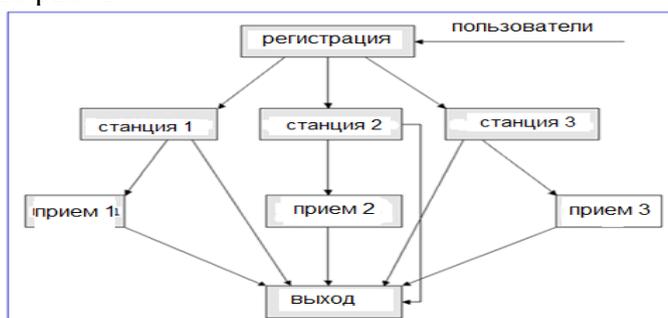


Рис. 1. Структура предприятия массового обслуживания

Fig. 1. Structure of a mass service enterprise

Основной проблемой крупных предприятий сферы услуг являются системы массового обслуживания. Работа указанной структуры осуществляется следующим образом: в модели GPSS активный элемент (приложение, человек) называется операцией, а блок создания приложения формирует поток транзакций, имитирующий поток запросов людей. Люди выстраиваются в очередь на стойке регистрации, где их обслуживают в течение определенного периода времени. После регистрации им предоставляется соответствующий приоритет. После этого человека (пользователя) направляют в одну из трех приемных. В зависимости от запроса пользователя он остается на объекте определенный период времени и после его обслуживания выходит из модели. После прохождения модели операция уничтожается, чтобы не занимать память.

GPSS-модель представлена на рис. 2.

```

GPSS World - Untitled Model 1
File Edit Search View Command
; kxm
generate 18,6
queue kxq
seize kxm
depart kxq
advance 16,4
release kxm
terminate 0
;timer
generate 480
terminate 1
start 1
    
```

Рис. 2. Модель GPSS предприятия массового обслуживания
 Fig. 2. GPSS model of a queuing enterprise

На рис. 3 показан пример фрагмента программного обеспечения, моделирующего работу предприятия сферы услуг по заданным входным потокам людей.

GPSS World - [Untitled Model 1.3.1 - REPORT]

GPSS World Simulation Report - Untitled Model 1.3.1

Wednesday, October 18, 2023 23:06:05

START TIME	END TIME	BLOCKS	FACILITIES	STORAGES
0.000	480.000	9	1	0

NAME	VALUE
KXM	10001.000
KXQ	10000.000

LABEL	LOC	BLOCK TYPE	ENTRY COUNT	CURRENT	COUNT	RETRY
	1	GENERATE	26	0	0	0
	2	QUEUE	26	0	0	0
	3	SEIZE	26	0	0	0
	4	DEPART	26	0	0	0
	5	ADVANCE	26	1	0	0
	6	RELEASE	25	0	0	0
	7	TERMINATE	25	0	0	0
	8	GENERATE	1	0	0	0
	9	TERMINATE	1	0	0	0

FACILITY	ENTRIES	UTIL.	AVE. TIME	AVAIL.	OWNER	PEND	INTER	RETRY	DELAY
KXM	26	0.863	15.926	1	27	0	0	0	0

QUEUE	MAX CONT.	ENTRY	ENTRY (0)	AVE. CONT.	AVE. TIME	AVE. (-0)	RETRY
KXQ	1	0	26	15	0.078	1.441	3.407

FEC	XN	PRI	BDT	ASSEM	CURRENT	NEXT	PARAMETER	VALUE
27	0		482.664	27	5	6		
28	0		482.707	28	0	1		
29	0		960.000	29	0	8		

Рис. 3. Программа GPSS, моделирующая работу предприятия массового обслуживания
 Fig. 3. GPSS program simulating the work of a mass service enterprise

Символы, используемые в модели GPSS:

Услуга 480 охватывает период 8 часов, т.е. 480 минут;

18.6 – пользователи подают заявку в течение 18 минут и предоставляют услугу в течение 6 минут;

26 – количество запросов пользователей на очереди;

25 – количество обслуживаемых пользователей.

Обсуждение результатов. Детальный анализ всей работы предприятия с использованием модели показывает, где наблюдаются большие задержки в уходе за людьми, что удлиняет очередь. Поэтому по результатам модели становятся понятны пути оптимизации работы и повышения качества сервиса.

Устройства сети Петри (СП) также могут использоваться для описания ПМО [8]. СП является одним из наиболее выразительных средств моделирования параллельных, синхронных и асинхронных процессов, отражающих деятельность предприятий. Аппаратные средства СП – это математические аппаратные средства, позволяющие реализовывать имитационные модели подсистем и проводить дополнительные исследования моделей GPSS. Модель элементов ПМК описывается с помощью СП:

$$N=(P, T, I, O, \mu), \quad (1)$$

где, $P=\{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ – множество позиций;

$T=\{t_1, t_2, \dots, t_r\}$ – множество переходов;

I – является входной функцией – отображением из переходов в комплекты позиций;

O – выходная функция – отображение из комплектов позиций в переходы;
 μ – начальная разметка позиций.

Структура сети получается путем определения позиций СП, количества переходов, а также функций ввода и вывода для каждой позиции и перехода. СП отражает логическую последовательность событий, позволяет отслеживать информационные потоки и прорабатывать взаимодействие процессов. Следовательно, они являются удобным инструментом для моделирования людских потоков и описания процесса организации очередей. Их преимущество заключается в простоте человеческого восприятия и понимания графических изображений, в том числе динамических. Узлы СП представлены графом с позициями (отмечены кружками) и переходами и соединены направленными дугами. Активный элемент (маркер) определяет, как работает сеть.

На рис. 4 показана схема СП, которая моделирует работу ПМО, обслуживающего поток приложения [9,10].

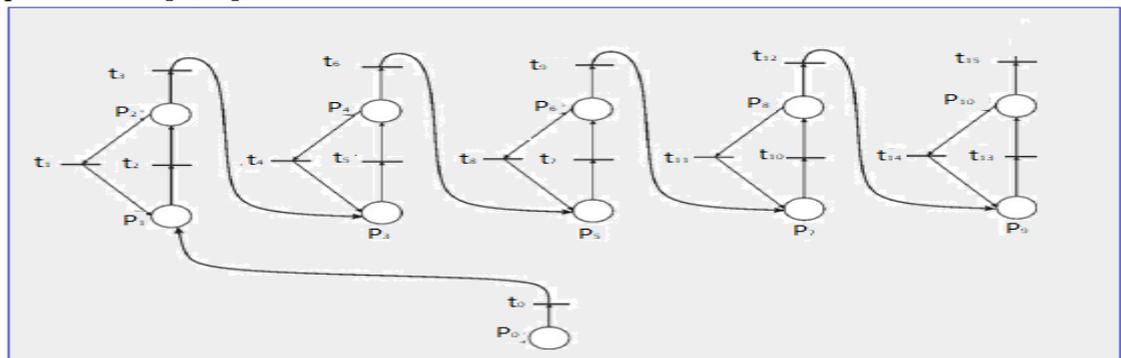


Рис. 4. Граф-схема СП, моделирующая работу предприятия массового обслуживания
Fig. 4. Flow chart of a service center simulating the operation of a mass service enterprise

Для встраиваемых моделей предусмотрены следующие символы:

Количество позиций следующее:

p_0 – Выпуск распознавания искусственного интеллекта;

p_1 – Регистрация;

p_2 – Прием заявок;

p_3 – Переадресация на пункты приема;

p_4 – Приемная станция 1 принимает;

p_5 – Приемник передает на выход точку 1;

p_6 – Приемная станция 2 принимает;

p_7 – точка приема 2 передает на выход;

p_8 – Прием принимает 3 станции;

p_9 – Прием передает на выход 3 точки;

p_{10} – Результаты обработки на выходе;

Набор переходов следующий:

t_0 – Запуск службы;

t_1 – Процесс регистрации;

t_2 – Направление по заявлениям;

t_3 – Переход на станцию Приема 1;

t_4 – Передача от входа 1 к выходу;

t_5 – Переход от точки приема 1 к выходу;

t_6 – Переход на Прием 2;

t_7 – Передача с точки приема 2 на выход;

t_8 – Переход от точки приема 2 к выходу;

t_9 – Переход на прием 3;

t_{10} – Передача с пункта приема 3 на выход;

t_{11} – Переход от точки приема 3 к выходу;

t_{12} – Переход от приема 1 к регистрации;

t_{13} – Переход от приема 2 к регистрации;

t_{14} – Переход от приема 3 к регистрации;

t_{15} – Переход на общий сервис.

Рассмотрим связь между моделями GPSS и СП. Позиции СП моделируются операторами языка GPSS следующим образом: SEIZE и RELEASE, которые описывают процессы загрузки и освобождения устройства; оператор ADVANCE, реализующий задержку, и операторы QUEUE и DEPART, моделирующие организацию очереди.

Операция перехода обычно моделируется в три этапа:

1. Проверка условия наличия хотя бы одного маркера во входных позициях и удаление (сбор) маркера оператором ASSEMBLE или GATHER;
2. Если это временная сеть Петри, то шаг задержки операции перехода выполняется оператором ADVANCE;
3. Перенос маркеров на выходные позиции операторами TRANSFER.

СП получает возможность рассмотреть и проанализировать внутреннюю структуру предприятия массового обслуживания, смоделировать имеющуюся у него техническую оснащенность. Также моделирование позволяет проверить алгоритмы обработки документооборота и определить эффективность структурной организации, например, учреждений здравоохранения. GPSS не имеет инструментов СП для визуализации работы системы и визуального отображения ее структуры.

Таким образом, когда язык моделирования GPSS и СП используются вместе, можно более полно проанализировать производительность такой сложной системы как коммунальное предприятие.

Вывод. Целесообразно использовать языковые аппараты GPSS и СП, обеспечивающие информационное обеспечение деятельности ПМО, моделирование структуры организации и информационных потоков.

Рассмотрение ПМО как сервиса самообслуживания позволяет оценивать ситуацию и управлять потоками людей, находить пробки и ограничивать нагрузку на отдельные отделения при возникновении очередей.

Моделирование предоставляет руководителям общую и детальную информацию, позволяет контролировать работу различных подразделений и служб, анализировать динамику изменения основных показателей деятельности сервисного предприятия.

Библиографический список:

1. Фенина О. В., Фенин А. О., Брик М. В. Сети Петри для моделирования искусственного интеллекта // Всероссийская научная конференция «Информационные технологии интеллектуальной поддержки принятия решений» Уфа, 2018. Т. 1. С. 290–299
2. Mamedov J.F., Abdullayev Q.S., Aliyev I.S., Safarova T.A. Developing Flexible Manufacture Cell in University Industrial Park and its Modeling // Proceedings 2019 International Russian Automation Conference (RusAutoCon) Sochi, Russia September 8-14, 2019
3. Suraj Z. An Approach to Modeling Decision-Making Systems Based on Uninorms and Petri Nets Submitted to 2023 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE 2023), August 13-17, 2023, Songdo Incheon, Korea (2023)
4. Yue W., Wan X., Li S., Ren H. and H. He, Simplified Neutrosophic Petri Nets Used for Identification of Superheat Degree, International Journal of Fuzzy Systems, (2022)
5. Valdez F. and, Castillo O and P. Melin, Bio-Inspired Algorithms and Its Applications for Optimization in Fuzzy Clustering, Algorithms (2021), 14, 122
6. Pascual-Fontanilles J., Valls A., A. Moreno and P. Romero-Aroca, Continuous Dynamic Update of Fuzzy Random Forests, International Journal of Computational Intelligence Systems, 15(1) (2022), art. no. 74.
7. Hafram, S.M., Valery, S. and Hasim, A.H., "Calibrating and validation microscopic traffic simulation models vissim for enhanced highway capacity planning", International Journal of Engineering, Transactions B: Applications, Vol. 36, No. 8, (2023), 1509-1519. doi: 10.5829/IJE.2023.36.08B.11
8. Mercan, M.C., Kayalica, M.Ö., Kayakutlu, G. and Ercan, S., "Economic model for an electric vehicle charging station with v ehicletogrid functionality", International Journal of Energy Research, Vol. 44, No. 8, (2020), 6697-6708. <https://doi.org/10.1002/er.5407>

9. Taheri, M., Arkat, J., Farughi, H. and Pirayesh, M., "Modeling the traffic signal control system at an isolated intersection using queuing systems", *International Journal of Engineering, Transactions C: Aspects*, Vol. 34, No. 9, (2021), 2077-2086. <https://doi.org/10.5829/IJE.2021.34.09C.05>
10. Джафарова Ш.М. Моделирование работы гибкого производственного модуля с помощью сетей петири. // Вестник компьютерных и информационных технологий, ISSN:1810-7206, №2, Москва-2022, ст.19-25. <http://www.vkit.ru/index.php/current-issue-rus/1123-019-025>

References:

1. Fenina O. V., Fenin A. O., Brik M. V. Petri nets for modeling artificial intelligence. All-Russian scientific conference "Information technologies for intelligent decision support" Ufa, 2018; 1: 290– 299 (In Russ).
2. Mamedov J.F., Abdullayev Q.S., Aliyev İ.S., Safarova T.A. Developing Flexible Manufacture Cell in University Industrial Park and its Modeling. *Proceedings 2019 International Russian Automation Conference (RusAutoCon) Sochi, Russia September 8-14, 2019*.
3. Suraj Z. An Approach to Modeling Decision-Making Systems Based on Uninorms and Petri Nets Submitted to 2023 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE 2023), August 13-17, 2023, Songdo Incheon, Korea (2023)
4. Yue W., Wan X., Li S., Ren H. and H. He, Simplified Neutrosophic Petri Nets Used for Identification of Superheat Degree, *International Journal of Fuzzy Systems*, (2022)
5. Valdez F. and Castillo O and P. Melin, Bio-Inspired Algorithms and Its Applications for Optimization in Fuzzy Clustering, *Algorithms*. 2021;14:122.
6. Pascual-Fontanilles J., Valls A., A. Moreno and P. Romero-Aroca, Continuous Dynamic Update of Fuzzy Random Forests, *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 2022; 15(1), art. no. 74.
7. Hafram, S.M., Valery, S. and Hasim, A.H., "Calibrating and validation microscopic traffic simulation models vissim for enhanced highway capacity planning", *International Journal of Engineering, Transactions B: Applications*, 2023; 36(8):1509-1519. doi: 10.5829/IJE.2023.36.08B.11
8. Mercan, M.C., Kayalica, M.Ö., Kayakutlu, G. and Ercan, S., "Economic model for an electric vehicle charging station with v ehicletoGRID functionality", *International Journal of Energy Research*, 2020; 44(8):6697-6708. <https://doi.org/10.1002/er.5407>
9. Taheri, M., Arkat, J., Farughi, H. and Pirayesh, M., "Modeling the traffic signal control system at an isolated intersection using queuing systems", *International Journal of Engineering, Transactions C: Aspects*, Vol. 34, No. 9, (2021), 2077-2086. <https://doi.org/10.5829/IJE.2021.34.09C.05>
10. Jafarova Sh.M. Modeling the operation of a flexible production module using Petri nets. *Bulletin of Computer and Information Technologies*, ISSN: 1810-7206, No. 2, Moscow-2022, Art. 19-25. <http://www.vkit.ru/index.php/current-issue-rus/1123-019-025> (In Russ).

Сведения об авторах:

Джафарова Шалала Мехти, доктор философии по техническим наукам, доцент, доцент кафедры «Информационные технологии»; shalala.cafarova@sdu.edu.az

Ахмедова Светлана Магеррам, доктор философии по техническим наукам, доцент кафедры «Информационные технологии»; svetlana.ahmadova@sdu.edu.az

Алиева Арзу Габил, доктор философии по техническим наукам, старший преподаватель кафедры «Информационные технологии»; arzu.aliyeva@sdu.edu.az

Information about authors:

Shalala M. Jafarova, Ph.D. (Technology), Assoc. Prof., Assoc. Prof., Department of Information Technologies; shalala.cafarova@sdu.edu.az

Svetlana M. Akhmedova, Ph.D. (Technology), Assoc. Prof., Department of Information Technology; svetlana.ahmadova@sdu.edu.az

Arzu G. Aliyeva, Ph.D. (Technology), Senior Lecturer, Department of Information Technologies; arzu.aliyeva@sdu.edu.az

Конфликт интересов/Conflict of interest.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов/The authors 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.

Технологии кеширования данных в современных микропроцессорах

В.А. Егунов, В.А. Шабаловский

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

Резюме. Цель. Исследование, представленное в статье, направлено на изучение методов повышения эффективности программного обеспечения в современных вычислительных системах с иерархической структурой памяти. **Метод.** Исследование основано на технологиях кеширования данных в микропроцессорах. **Результат.** Представлены результаты анализа различных подходов к разработке эффективного программного обеспечения с учетом характеристик подсистемы памяти вычислительной системы, что позволило доказать важность кеш-памяти в улучшении производительности и взаимодействии компонентов компьютера. **Вывод.** Кеш-память является критически важным элементом в архитектуре микропроцессоров, играющим ключевую роль в определении производительности вычислительной системы. Оптимизация использования кеша может заметно улучшить время доступа к данным и, как следствие, общую производительность системы. Разработчикам программного обеспечения необходимо уделять особое внимание характеристикам подсистемы памяти при проектировании и реализации решений.

Ключевые слова: кеш-память, оптимизация, эффективность программного обеспечения, кеш-промах, кеш-попадание, ассоциативность кеш-памяти

Для цитирования: В.А. Егунов, В.А. Шабаловский. Технологии кеширования данных в современных микропроцессорах. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2024; 51(3):60-71. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-3-60-71

Data caching technologies in modern microprocessors

V.A. Egunov, V.A. Shabalovsky

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

Abstract. Objective. The study presented in the paper is aimed at studying the methods for improving the efficiency of software in modern computing systems with a hierarchical memory structure. **Method.** The study is based on data caching technologies in microprocessors. **Result.** The article presents the results of the analysis of various approaches to the development of efficient software taking into account the characteristics of the memory subsystem of the computing system, which made it possible to prove the importance of cache memory in improving the performance and interaction of computer components. **Conclusion.** Cache memory is a critical element in the architecture of microprocessors, playing a key role in determining the performance of the computing system. Optimizing the use of cache can significantly improve data access time and, as a result, overall system performance. Software developers need to pay special attention to the characteristics of the memory subsystem when designing and implementing solutions.

Keywords: cache memory, optimization, software efficiency, cache miss, cache hit, associativity of cache memory

For citation: V.A. Egunov, V.A. Shabalovsky. Data caching technologies in modern microprocessors. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2024; 51(3):60-71. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-3-60-71

Введение. Кеширование данных в современных микропроцессорах (МП) представляет собой ключевой элемент оптимизации работы вычислительных систем. Эта технология направлена на улучшение производительности путем ускорения доступа к данным, которые МП использует наиболее часто [1, 2]. Практически каждое современное ядро МП, от чипов со сверхнизким энергопотреблением, таких как ARM Cortex-A5 [3], до процессоров Intel Core i9 [4], использует кеш-память. Значимость кеш-памяти в компьютерных системах сложно переоценить. Несмотря на то, что производительность компьютера часто зависит от целого ряда характеристик, таких как частота или объем оперативной памяти, кеш-память играет ключевую роль в определении, насколько эффективно эти компоненты могут взаимодействовать. Кеш-память значительно снижает время доступа МП к основной памяти, сохраняя часто используемые данные и инструкции. Это приводит к ускорению доступа к данным и заметному увеличению общей производительности системы.

Постановка задачи. В статье рассматриваются принципы организации кеширования данных в современных МП, анализируются различные подходы и методы оптимизации, а также влияние этих технологий на общую производительность вычислительных систем. Постоянное совершенствование МП и подсистем памяти, в т.ч. кеш-памяти, требуют поиска новых и использования существующих подходов к разработке эффективного программного обеспечения, в полной мере учитывающего возможности современных вычислительных систем.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

1. Рассмотреть современные технологии кеширования данных в микропроцессорах.
2. Провести обзор перспективных исследований и разработок в данной области.
3. Проанализировать подходы к разработке эффективного программного обеспечения с учетом характеристик подсистемы памяти вычислительной системы.

Методы исследования. Аналитически обобщим современные технологии кеширования данных в микропроцессорах.

Кеширование – техника, используемая для повышения производительности компьютерных систем за счет хранения копий данных или результатов вычислений во временной области хранения, известной как кеш-память. Это позволяет быстрее получать доступ к часто используемой информации, сокращая время и ресурсы, необходимые для извлечения данных из более медленных слоев хранения [5]. Данная технология, во-первых, повышает скорость доступа к данным, так как извлечение информации из кеша занимает значительно меньше времени по сравнению с основными местами хранения, такими как основная память, жесткие диски или сетевые соединения.

Во-вторых, использование кеша повышает эффективность системы, поскольку снижает нагрузку на основные хранилища и сеть, что в конечном итоге улучшает общую производительность. Наконец, использование кеша также обеспечивает экономическую выгоду, т.к. позволяет оптимизировать использование ресурсов и обрабатывать больше задач с меньшим количеством оборудования, что приводит к снижению затрат.

Кеш-память процессора используется для уменьшения времени доступа к основной памяти, являясь одним из верхних уровней иерархии памяти. Кеш использует небольшую, быструю память (типа SRAM или SDRAM), которая хранит копии часто используемых данных из основной памяти. Если большая часть запросов в память будет обрабатываться кеш-памятью, средняя задержка обращения к памяти будет приближаться к задержкам работы кеша. Самая маленькая единица данных, которая может быть передана между кешем и основной памятью, называется кеш-линия или строка кеша. При этом оптимизация процесса чтения и записи данных осуществляется за счет работы с блоками данных, а не с отдельными байтами [6]. Использование кеш-памяти для повышения эффективности программного обеспечения связано с понятиями пространственной и временной локальности [7]. Пространственная локальность предполагает, что обращение к определенным местам хранения часто сопровождается обобщениями к близлежащим местам, что используется кешами для извлечения и хранения блоков данных в предвидении будущего доступа.

Другими словами, если произошло обращение к данным, расположенным по адресу i , велика вероятность, что следующим обращение будет осуществлено по адресу $(i + 1)$ / Временная локальность, в свою очередь, указывает на то, что если к определенным данным был доступ недавно, вероятно, к ним снова будет осуществлен доступ в ближайшем будущем.

В настоящее время используются различные технологии, связанные с кешированием данных, применяемые с целью повышения эффективности вычислительных систем. К основным технологиям, используемым в подсистемах памяти современных МП, можно отнести следующие.

Многоуровневая кеш-память. Современные МП часто используют многоуровневую кеш-систему, включающую кеши L1, L2 и L3. В некоторых системах также могут присутствовать кеши более высоких уровней, например L4, но такие архитектуры используются в настоящий момент редко [8]. Основной принцип работы многоуровневого кеша – минимизировать задержку при обменах между МП и памятью, получая при этом больший объем буферной памяти для хранения данных.

Кеш первого уровня самый маленький и быстрый. Его размер небольшой, обычно от 2 до 64 КБ. Кеш L1 делится на две части: одна для хранения инструкций L1i и другая для хранения данных L1d. Это разделение поддерживает различную полосу пропускания выборки, используемую МП, поскольку большинство программ обычно требует больше кеша для данных, чем для инструкций. Кеш L2 больше по размеру и немного медленнее по скорости по сравнению с L1. L2 может совместно использоваться несколькими ядрами или только одним, в зависимости от архитектуры ЦП. Размер L2 в современных МП от 64 КБ до 512 КБ. Кеш L3 больше, чем L1 и L2, но гораздо более медленный, чаще всего разделяется всеми ядрами. Кеш L3 играет важную роль в совместном использовании данных и в организации связи между ядрами МП. Размер L3 составляет от 1 МБ до 62 МБ в зависимости от типа МП. Многоуровневая кеш-память является ключевым компонентом архитектуры современных МП, позволяющим значительно уменьшить задержки при обращении к основной памяти и повысить общую производительность системы.

Ассоциативная организация кеша задает способ отображения строк основной памяти на строки кеш-памяти, который определяет способ хранения и поиска данных в кеше. Данная характеристика кеш-памяти оказывает большое влияние на скорость доступа к данным и эффективность кеширования [10].

Выделяют три основных типа ассоциативности в кеш-памяти:

Кеш-память с прямым отображением (рис.1).

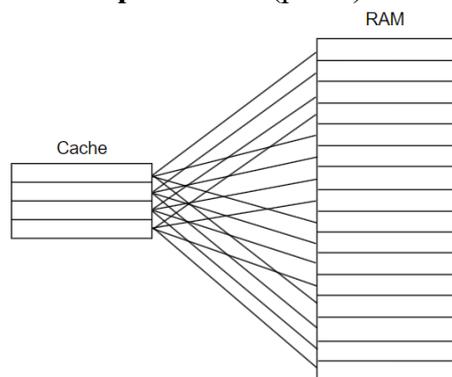


Рис. 1. Кеш-память с прямым отображением

Fig. 1. Direct Mapped Cache

Это самый быстрый подход к отображению памяти, который используется для копирования блока основной памяти в доступную строку кеша. Данный алгоритм назначает блок памяти определенной строке кеша напрямую, без дополнительных промежуточных процессов [11]. Если строка кеша уже занята другим блоком памяти, то предыдущий блок удаляется для загрузки в него нового. При этом адрес ячейки в памяти компьютера разбивается на три составляющих: смещение в строке кеша; номер строки кеша, в которую помещается строка основной памяти, содержащая требуемые данные; тег, используемый кеш-памятью для иден-

тификации строки. По номеру строки в основной памяти кеш-контроллер однозначно определяет строку кеша, в которую надо поместить загружаемые данные.

Полностью ассоциативная кеш-память (рис. 2). При таком варианте отображения любая строка основной памяти может быть размещена в любой строке кеш-памяти [12]. Данный подход характеризуется высокой эффективностью, гибкостью и более высокой скоростью по сравнению с прямым отображением.

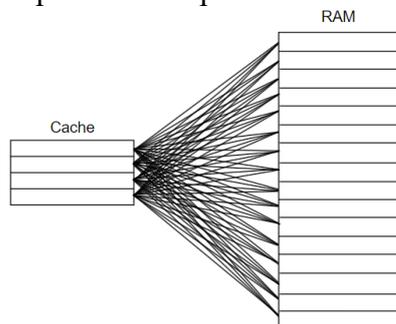


Рис. 2. Полностью ассоциативное отображение
Fig. 2. Fully associative mapping

Кеш-память с множественно – ассоциативным отображением (рис.3). Данный тип кеш-памяти сочетает в себе достоинства двух предыдущих вариантов, представляя собой компромиссный вариант. В данном случае кеш-память делится на множества, при этом отображения на множества осуществляются в «прямом» режиме, размещение внутри множества – полностью ассоциативное.

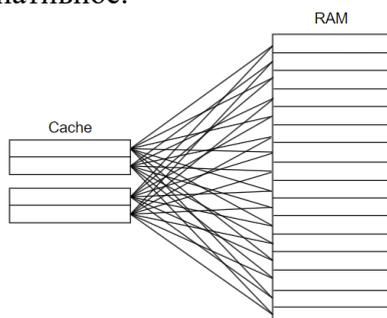


Рис. 3. Кеш-память с множественно – ассоциативным отображением
Fig. 3. Cache memory with multiple-associative mapping

В табл. 1 приведены оценки вероятности промахов кеша в различных конфигурациях. Вероятность промаха классифицируется как «Низкая», «Средняя», «Высокая» на основе общих принципов, поскольку конкретные задачи могут значительно различаться в зависимости от рабочей нагрузки, размера кеша и архитектуры системы.

Табл.1 отображает, как ассоциативность кеша влияет на различные типы и общую вероятность промахов. Обязательные промахи остаются неизменными во всех вариантах, поскольку они зависят от первого доступа к данным.

На вероятность обязательных промахов оказывает влияние размер кеш-линии и предвыборка данных. Промахи по емкости также остаются довольно стабильными, так как они в большей степени зависят от размера кеша, чем от его ассоциативности.

Ассоциативность в данном случае может оказать влияние только в случае использования данных, не представляющих собой непрерывный массив. Конфликтные промахи уменьшаются с увеличением ассоциативности, ведущей к снижению вероятности промахов в кеше.

Таким образом, выбор типа ассоциативности кеша зависит от конкретных требований к производительности и стоимости системы. Баланс между скоростью, стоимостью и сложностью реализации определяет, какой тип ассоциативности будет выбран для конкретной архитектуры. В подавляющем большинстве современных МП используются множественно-ассоциативные кеша.

Таблица 1. Оценка вероятности кеш-промахов
Table 1. Estimation of the probability of cache misses

Тип кеша Cache type	Обязательные промахи Mandatory misses	Промахи по емкости Misses by capacity	Конфликтные промахи Conflict misses	Оценка общей вероятности промахов Estimation of the overall probability of misses
Прямое отображение Direct display	Тип кеш-памяти не оказывает влияния Cache type has no effect	Тип кеш-памяти не оказывает влияния Cache type has no effect	Высокая High	Высокая High
2-way Set Associative			Средняя Average	Средне-высокая Medium-high
4-way Set Associative			Низкая Low	Средняя Average
8-way Set Associative			Очень низкая Very low	Низко-средняя Low-medium
Полностью ассоциативный Fully associative			Отсутствует Absent	Низкая Low

Предвыборка данных (cache prefetching). Данная техника повышения производительности заключается в асинхронной загрузке данных из основной памяти в кеш-память заранее, до того, как эти данные будут запрошены МП [13]. Это позволяет снизить задержки при обращении к данным, которые не находятся в кеше, увеличивая общую производительность системы и эффективность программного обеспечения. В большинстве современных МП реализована автоматическая аппаратная предвыборка кода и данных. Предвыборка кода тесно связана с предсказанием ветвлений и выходит за рамки настоящего исследования. Предвыборка данных позволяет МП заранее загружать данные, которые могут понадобиться программе на следующих этапах работы. МП анализирует, по каким адресам и в каком порядке обращается программа и пытается предсказать, какие данные понадобятся в ближайшем будущем, осуществляет их автоматическую предвыборку в кеш-память. Самым простым и наиболее часто используемым методом предсказания здесь является метод загрузки следующей кеш-линии из основной памяти. Данный метод оказывается очень эффективным при последовательном доступе к памяти. При случайном доступе в память предвыборка не оказывает должного эффекта, при этом может даже оказывать отрицательное влияние, засоряя кеш-память ненужными данными. Существует также возможность программной предвыборки данных, для этого в МП существуют специальные команды, которые позволяют загрузить данные в необходимый уровень кеш-памяти. Часто данные команды вставляются в код программы компиляторами в процессе оптимизации кода. Данные команды также могут использоваться непосредственно программистами, однако чаще используются соответствующие интринсики. В частности, интриндик `_mm_prefetch` является частью расширения SIMD (Single Instruction, Multiple Data) от Intel [14]. SIMD-инструкции позволяют выполнять операции над несколькими данными одной командой МП, улучшая тем самым, производительность обработки данных. `_mm_prefetch` предназначена для предвыборки данных в кеш, позволяя программисту указать, какие данные скоро будут нужны, чтобы они могли быть загружены заранее.

Пример использования `_mm_prefetch`.

```
#include <xmmintrin.h>
void processLargeArray(float* array, int size) {
    for (int i = 0; i < size; i++) {
        // Предвыборка следующего блока данных в кэш
        _mm_prefetch((const char*)&array[i + 16], _MM_HINT_T0);
    }
}
```

В приведенном примере предвыборка используется для загрузки данных из большого массива `float` в кеш перед их обработкой. Аргумент `_MM_HINT_T0` указывает на уровень кеша, в который следует загрузить данные (в данном случае — кеш L1). Следует отметить, что для получения прироста производительности необходимо правильно подби-

рять шаг предвыборки. Однако, при правильном использовании данная методика является достаточно мощным инструментом оптимизации программного обеспечения.

Раздельный кеш данных и инструкций. Во многих МП кеш данных и инструкции разделяются. Это связано с тем, что в процессе обработки данных объем считываемых инструкций и данных может сильно отличаться. Кроме того, подобный подход обладает рядом преимуществ. Так, например, разделенный кеш может иметь вдвое большую пропускную способность по сравнению с объединенным кешем. Использование разделенного кеша оказывает сильное влияние на производительность МП, имеющих конвейер команд, т.к. доступ к инструкциям и данным можно организовать в одном и том же цикле на различных этапах конвейера. Есть и чисто технологические преимущества от такого подхода, которые заключаются в том, что кеш инструкций можно разместить рядом с блоком выборки инструкций, а кеш данных - рядом с блоком памяти. Такой подход может сократить задержки обоих блоков. Кроме того, т.к. объем считываемых инструкций и данных в подавляющем числе случаев сильно отличается, инструкции и данные не будут конфликтовать друг с другом в общем кеше. Стоит отметить, что разделенная технология используется в современных МП для реализации кеша L1. Раздельные кешы данных и инструкций широко используются в современных МП, включая такие архитектуры как x86 и ARM. Производители, такие как Intel, AMD и Apple, в своих процессорах используют этот подход для оптимизации производительности.

Обсуждение результатов. Подходы к разработке эффективного программного обеспечения с учетом характеристик подсистемы памяти вычислительной системы. В настоящее время ведутся исследования и разработки для повышения производительности и масштабируемости в современных вычислительных системах [15].

Рассмотрим основные направления: интеллектуальное кеширование (Smart Caching), 3D-стекирование памяти, оптимизация для специализированных задач, гибридные кеш-системы, уменьшение электропотребления.

Интеллектуальное кеширование использует алгоритмы машинного обучения и искусственного интеллекта для предсказания того, какие данные будут запрошены приложениями в ближайшем будущем, чтобы заранее загрузить эти данные в кеш. Это позволяет сократить время доступа к данным и увеличить общую производительность системы [16]. Примером могут служить алгоритмы, основанные на нейронных сетях. Они могут анализировать образцы доступа к данным и оптимизировать стратегии кеширования на лету. По сути, данная технология представляет собой «умную предвыборку» и может стать существенным фактором в дальнейшем совершенствовании технологии кеширования данных в МП.

3D-стекирование памяти позволяет увеличить плотность хранения данных и пропускную способность, стекируя несколько слоев памяти друг на друга вертикально. Данная технология уменьшает физическое расстояние между процессором и памятью, сокращая задержки и повышая скорость передачи данных.

Примером служит HBM (High Bandwidth Memory), которая используется в графических процессорах и устройствах для высокопроизводительных вычислений, обеспечивая значительно большую пропускную способность по сравнению с традиционной памятью. Стоит отметить, что данная технология разрабатывается многими ведущими IT-компаниями, в частности, Intel и AMD. Гибридные кеш-системы комбинируют различные типы кэш-памяти (например, SRAM, DRAM, Flash) в одной системе, используя их преимущества для повышения эффективности хранения и доступа к данным [17]. Примером таких систем является использование быстрой SRAM для кеширования наиболее часто используемых данных и более медленной, но емкой Flash-памяти для редко используемых данных. Разработка энергоэффективных архитектур кеша включают в себя использование технологий, минимизирующих энергопотребление при доступе к данным и их хранении, например: оптимизированные алгоритмы кеширования, минимизирующие число промахов кеша, что снижает количество энергозатратных операций доступа

к основной памяти; применение низкоэнергетических технологий памяти, например, LPDDR для кеша низких уровней. Примером служит технология Intel's Speed Shift, которая позволяет процессору более динамично управлять частотой и напряжением, оптимизируя энергопотребление в зависимости от текущей нагрузки. Оптимизация программного обеспечения с учётом характеристик подсистемы памяти вычислительной системы является ключевым аспектом достижения максимальной производительности. Необходимо руководствоваться определенными принципами программирования и оптимизации, чтобы увеличить эффективность программного обеспечения. Вот некоторые из них:

1. Локальность данных. Кеш-память работает эффективнее, когда программа проявляет высокую степень локальности данных. Существуют два типа локальности. Временная локальность предполагает, что после того, как программа получила доступ к определенному фрагменту данных, вероятно, она будет обращаться к нему снова в ближайшем будущем. Чтобы использовать временную локальность, достаточно повторно использовать данные, к которым осуществлялось обращение, и которые были помещены в кеш-память [18]. Пространственная локальность предполагает организацию доступа к данным, которые расположены рядом с данными, к которым недавно также осуществлялся доступ. Чтобы воспользоваться свойствами пространственной локальности, необходимо обеспечить доступ к данным, размещенным в памяти последовательно [18]. Кроме того, из принципа пространственной локальности вытекает необходимость обработки данных в той последовательности, в которой они расположены в памяти. Например, C хранит массивы построчно, в то время как Fortran хранит в порядке столбцов. Примеры на языке C приведены ниже.

Пространственная локальность

```
for (int i = 0; i < rows; ++i) {  
    for (int j = 0; j < cols; ++j) {  
        // Обработка элемента matrix[i][j]  
    }  
}
```

Временная локальность

```
int sumArray(int* array, int size) {  
    int sum = 0;  
    //Повторное использование //переменной sum  
    for (int i = 0; i < size; ++i) {  
        sum += array[i];  
    }  
    return sum;  
}
```

Оптимизация доступа к памяти достигается за счет приведенных выше методов, хотя стоит отметить, что использование свойств временной локальности оказывается гораздо более выгодным в случае обращения к блокам данных, а не к отдельным переменным. Например, вместо многократного обращения к отдельной переменной, стоит стремиться к многократному использованию блока данных, ранее уже помещенного в кеш-память. В частности, изменение порядка обработки строк и столбцов матрицы может улучшить использование кеш-памяти. Ниже приведен классический код умножения матрицы на языке C, включающий в себя три цикла: цикл по строкам, цикл по столбцам и цикл вычисления скалярного произведения.

```
for (int i = 0; i < n; ++i) {  
    for (int j = 0; j < n; ++j) {  
        for (int k = 0; k < n; ++k) {  
            result[i][j] += a[i][k] * b[k][j];  
        }  
    }  
}
```

Данную реализацию назовем *ijk* по порядку следования циклов. Однако, циклы можно менять местами, серьезно изменяя итоговую производительность. Результат исследования таких перестановок приведен в табл. 2. Замеры времени осуществлялись на одной и той же вычислительной системе для матриц одинаковой размерности.

Из табл. 2 видно, что циклы с порядками *ikj* и *kij* являются наиболее быстрыми. Такая скорость достигается за счёт того, что при указанном порядке выполнения циклов обращение к данным происходит в пределах одной в кеш-линии, что обеспечивает кеш-

попадания. Теоретически, порядок ijk должен быть самым быстрым вариантом за счёт того, что при таком порядке обращение к разным строкам матриц происходит реже всего, что увеличивает кэш-попадания. Однако порядок kij показывает аналогичный результат.

Таблица 2. Исследование программы умножения матриц
Table 2. Study of the matrix multiplication program

Вид цикла Cycle type	Время, с Time, s
ijk	1.1693
ikj	0.4675
jik	1.11
jki	2.7319
kij	0.4777
kji	2.7470

2. Блочная реализация алгоритмов. Размеры блоков подбираются таким образом, чтобы целиком помещаться в кэш-память определенного уровня, чаще всего оптимизация осуществляется под L1. В данном случае в соответствии с принципами пространственной и временной локальности количество кэш-промахов минимизируется. Пример блочного разделения матриц приведен на рис. 4, там же приводится алгоритм блочного умножения матриц.

$$\begin{pmatrix} A_{00} & A_{01} & \dots & A_{0q-1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ A_{q-10} & A_{q-11} & \dots & A_{q-1q-1} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} B_{00} & B_{01} & \dots & B_{0q-1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ B_{q-10} & B_{q-11} & \dots & B_{q-1q-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{00} & C_{01} & \dots & C_{0q-1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ C_{q-10} & C_{q-11} & \dots & C_{q-1q-1} \end{pmatrix} \quad C_{ij} = \sum_{s=1}^q A_{is} B_{sj}$$

Рис. 4. Блочный алгоритм умножения матриц
Fig. 4. Block matrix multiplication algorithm

Размеры блоков могут варьироваться в зависимости от типа МП в соответствии с размером кеша L1. Классическим примером в этой области является блочное умножение матриц, при котором исходные матрицы делится на блоки меньшего размера [19].

```

void multiplyMatricesBlock(int** a, int** b, int** result, int n, int blockSize) {
    for (int i = 0; i < n; i += blockSize) {
        for (int j = 0; j < n; j += blockSize) {
            for (int k = 0; k < n; k += blockSize) {
                for (int ii = i; ii < i + blockSize; ii++) {
                    for (int kk = k; kk < k + blockSize; kk++) {
                        for (int jj = j; jj < j + blockSize; jj++) {
                            result[ii][jj] += a[ii][kk] * b[kk][jj];
                        }
                    }
                }
            }
        }
    }
}
    
```

При оптимальных размерах блоков эффективность программы значительно возрастает.

3. Оптимизация под длину строки кеша. Необходимо учитывать длину строки кеш-памяти при проектировании структур данных. Каждый МП имеет фиксированную длину строки кеша, которую несложно узнать, в т.ч. и программным путем.

Для уменьшения числа загрузок кеш-строк и снижения вероятности кэш-промахов, лучше выравнивать данные по границам кеш-строк.

Данной цели может помочь добиться выделение памяти под массивы данных размерами, кратными длине кеш-строк, а также выравнивание статически определяемых и динамически выделяемых массивов данных по границам строк (например, функция `_mm_malloc()`).

```
#define CACHE_LINE_SIZE 64
typedef struct {
    // Размер структуры кратен размеру строки кеша
    char data[CACHE_LINE_SIZE];
} CacheLineData;
void processCacheAlignedData(CacheLineData* data) {
    // Обработка данных, выровненных по строке кеша
}
```

4. Компилятор и флаги компилятора. Современные компиляторы могут оптимизировать код с целью повышения эффективности использования кеш-памяти.

Для использования этой опции необходимо использовать соответствующие флаги компилятора, такие как `-O2` или `-O3` в GCC. Кроме того, некоторые компиляторы имеют возможность оптимизации кода под целевую архитектуру вычислительной системы, например, Intel C++ Compiler. Примером использования флагов могут служить флаги компиляции для GCC [21].

```
gcc -O2 myprogram.c -o myprogram
```

5. Профилирование и бенчмаркинг. Для изучения взаимодействия программы с кеш-памятью можно воспользоваться инструментами профилирования. Программы, такие как `perf` в Linux, встроенные анализаторы производительности в средах разработки (IDE) или специализированные приложения, такие как Intel VTune Amplifier, помогут выявить потенциальные проблемы, связанные с кеш-памятью. Использование инструмента «`perf`» [22] для анализа кеш-промахов представлен ниже.

```
perf stat -e cache-misses,cache-references ./myprogram
```

6. Привязка потоков. При работе с многопоточными программами используются методы привязки потоков к конкретным ядрам МП. Данная техника позволяет уменьшить вероятность конфликтов в кеше между потоками. В приведенном примере происходит привязка потока к конкретному ядру МП с использованием `pthread`.

```
int main() {
    pthread_t thread;
    cpu_set_t cpuset;
    pthread_create(&thread, NULL, threadFunction, NULL);
    CPU_ZERO(&cpuset);
    CPU_SET(0, &cpuset);
    pthread_setaffinity_np(thread, sizeof(cpu_set_t), &cpuset);
    pthread_join(thread, NULL);
    return 0;
}
```

7. Кеш-оптимизация отдельных задач. Задача кеш-оптимизации привлекает широкое внимание исследователей в т.ч., потому, что данная методика позволяет существенно повысить эффективность получаемого программного обеспечения. Существует большое число публикаций, посвященных оптимизации программных реализаций конкретных вычислительных задач. В качестве примера можно привести многочисленные исследования в области оптимизаций процедур BLAS (Basic Linear Algebra Subprograms) и LAPACK (Linear Algebra PACKage). Авторы также публиковали результаты своих исследований в этой области [23, 24], а также в области улучшения стратегии кеширования данных для вычислительных систем с иерархической структурой памяти [25, 26].

Вывод. Полученные результаты наглядно демонстрируют необходимость кеш-оптимизации, а также возможность получения значительного прироста производительности программного обеспечения.

Результаты анализа подходов к разработке эффективного программного обеспечения с учетом характеристик подсистемы памяти вычислительной системы выявил важность оптимизации программ для улучшения взаимодействия с кеш-памятью.

В целом можно сказать, что внимательное отношение к характеристикам кеш-памяти и осознанное использование доступных инструментов и методик оптимизации

позволяет значительно улучшить производительность программного обеспечения, уменьшить время выполнения задач и повысить общую эффективность вычислительных систем.

Анализ различных подходов к разработке эффективного программного обеспечения с учетом характеристик подсистемы памяти вычислительной системы позволил выявить важность кеш-памяти в улучшении производительности и взаимодействии компонентов компьютера.

Разработка различных методов оптимизации использования кеш-памяти, включая локальность данных, оптимальное кеширование структур данных, учет длины строки кеша, использование флагов компилятора для оптимизации, профилирование и бенчмаркинг, а также привязку потоков к конкретным ядрам МП, открыло новые возможности для разработчиков программного обеспечения в направлении повышения эффективности их продуктов. Кеш-память является критически важным элементом в архитектуре микропроцессоров, играющим ключевую роль в определении производительности вычислительной системы.

Оптимизация использования кеша может заметно улучшить время доступа к данным и, как следствие, общую производительность системы. Разработчикам программного обеспечения необходимо уделять особое внимание характеристикам подсистемы памяти при проектировании и реализации своих решений, используя современные подходы и технологии кеширования для достижения наилучших результатов.

Библиографический список:

1. Bhat, Subrahmanya and Bhat, Subrahmanya and Kamath, K. R, Cache Hierarchy in Modern Processors and Its Impact on Computing (May 11, 2017). International Journal of Management, IT and Engineering (IJMIE), Volume 5, Issue 7, pp. 248-253, ISSN: 2249-0558, July 2015, Proceedings of National Conference "Recent Advances in IT, Management and Social Sciences", Manegma – 2015, Mangalore on 23rd April, 2015, ISBN No. 978-81-929306-6-4, Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=2966616>
2. Alexander von Bülow, Jürgen Stohr, and Georg Färber Towards an Efficient Use of Caches in State of the Art Processors for Real-Time Systems // Work-In-Progress Session of the 16th Euromicro Conference on Real-Time Systems. — Catania, Italy: Steve Goddard, 2004. — С. 5-9.
3. Cortex-A5 // developer.arm URL: <https://developer.arm.com/Processors/Cortex-A5>
4. Processeurs Intel® Core™ de 14^e génération pour PC de bureau // intel.fr URL: <https://www.intel.fr/content/www/fr/fr/products/docs/processors/core/core-14th-gen-desktop-brief.html>
5. Антонов А.А., Ключев А.О., Комар М.С., Кустарев П.В., Кучерявый Е.А., Молчанов Д.А., Петров В.И., Платунов А.Е. Разработка протокола множественного доступа для процессоров с многоуровневым кешированием // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. №3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-protokola-mnozhestvennogo-dostupa-dlya-protessorov-s-mnogourovnevym-keshirovaniem>.
6. Measuring the size of the cache line empirically // lemire URL: <https://lemire.me/blog/2023/12/12/measuring-the-size-of-the-cache-line-empirically/>
7. Bruce Jacob, Spencer W. Ng, David T. Wang, CHAPTER 1 - An Overview of Cache Principles, Editor(s): Memory Systems, Morgan Kaufmann, 2008, Pages 57-77, ISBN 9780123797513.
8. Eze, Val & Eze, Martin & Edozie, Enerst & Eze, Esther. (2023). Design and Development of Effective Multi-Level Cache Memory Model. International Journal of Recent Technology and Applied Science (IJORTAS). 5. 54-64. 10.36079/lamintang.ijortas-0502.515.
9. IBM's New System Z CPU Offers 40 Percent More Performance per Socket, Integrated AI // extremetech URL: <https://www.extremetech.com/computing/326402-ibms-new-system-z-cpu-offers-40-percent-more-performance-per-socket-integrated-ai>
10. Cache Memory in Computer Organization // geeksforgeeks URL: <https://www.geeksforgeeks.org/cache-memory-in-computer-organization/>.
11. Jouppi, Norman. (1998). Improving Direct-Mapped Cache Performance by the Addition of a Small Fully-Associative Cache Prefetch Buffers.. Conference Proceedings - Annual Symposium on Computer Architecture. 18. 388-397. 10.1109/ISCA.1990.134547.
12. Garzón, Esteban & Hanhan, Robert & Lanuzza, Marco & Teman, Adam & Yavits, Leonid. (2024). FASTA: Revisiting Fully Associative Memories in Computer Microarchitecture. IEEE Access. PP. 10.1109/ACCESS.2024.3355961.
13. Guocong Quan, Atilla Eryilmaz, Jian Tan, Ness Shroff, Prefetching and caching for minimizing service costs: Optimal and approximation strategies, Performance Evaluation, 2021;145:102149, ISSN 0166-5316,

14. Function `core::arch::x86_64::mm_prefetch` // `doc.rust-lang` URL: https://doc.rust-lang.org/beta/core/arch/x86_64/fn_mm_prefetch.html.
15. Филисов Д.А. Стратегии оптимизации для высоконагруженных приложений: повышение общей производительности // Вестник науки. 2023. №7 <https://cyberleninka.ru/article/n/strategii-optimizatsii-dlya-vysokonagruzhennyh-prilozheniy-povyshenie-obschey-proizvoditelnosti>.
16. Wu, HT., Cho, HH., Wang, SJ. *et al.* Intelligent data cache based on content popularity and user location for Content Centric Networks. *Hum. Cent. Comput. Inf. Sci.* 2019;(9)44. <https://doi.org/10.1186/s13673-019-0206-5>.
17. Аль-згуль Мосаб Басам Гибридные алгоритмы в системах кэширования объектов // *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2008. №4-39. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/gibridnye-algoritmy-v-sistemah-keshirovaniya-obektov>.
18. Locality of Reference and Cache Operation in Cache Memory // `turbopages` URL: <https://www.geeksforgeeks.org/locality-of-reference-and-cache-operation-in-cache-memory/>.
19. Юрушкин М. В., Семионов С. Г. Перераспределение матриц к блочному виду с минимизацией использования дополнительной памяти // *Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки*. 2017. №3 (195). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/pererazmeschenie-matrits-k-blochnomu-vidu-s-minimizatsiey-ispolzovaniya-dopolnitelnoy-pamyati>.
20. LRU Cache — A Cache Data Structure // `medium` URL: <https://ogroetz.medium.com/lru-cache-a-cache-data-structure-1fab0d948e94>.
21. GCC, the GNU Compiler Collection // `gcc.gnu` URL: <https://gcc.gnu.org/>.
22. Chapter 25. Profiling memory accesses with `perf mem` // `access.redhat` URL: https://access.redhat.com/documentation/enus/red_hat_enterprise_linux/8/html/monitoring_and_managing_system_status_and_performance/
23. Егунов В.А. Кэш-оптимизация процесса вычисления собственных значений на параллельных вычислительных системах // *Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии*. - 2019. - № 1 (45). - С. 154-163.
24. Егунов В.А. О влиянии кэш-памяти на эффективность программной реализации базовых операций линейной алгебры // *Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии*. - 2018. - № 3. - С. 88-96.
25. Егунов, В.А. Метод улучшения стратегии кэширования для вычислительных систем с общей памятью / В.А. Егунов, А.Г. Кравец // *Программная инженерия*. - 2023. - Т. 14, № 7. - С. 329-338. - DOI: 10.17587/prin.14.329-338.
26. Kravec A.G., Egunov V.A. The Software Cache Optimization-Based Method for Decreasing Energy Consumption of Computational Clusters // *Energies*. 2022;15(20):16 (October-2) [Special issue «Smart Energy and Sustainable Environment»]. Article 7509. 16p. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15207509>.

References:

1. Bhat, Subrahmanya and Bhat, Subrahmanya and Kamath, K. R, Cache Hierarchy in Modern Processors and Its Impact on Computing (May 11, 2017). *International Journal of Management, IT and Engineering (IJMIE)*, Volume 5, Issue 7, Pp. 248-253, ISSN: 2249-0558, July 2015, Proceedings of National Conference “Recent Advances in IT, Management and Social Sciences”, Manegma – 2015, Mangalore on 23rd April, 2015, ISBN No. 978-81-929306-6-4, Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=2966616>
2. Alexander von Bülow, Jürgen Stohr, and Georg Färber Towards an Efficient Use of Caches in State of the Art Processors for Real-Time Systems. *Work-In-Progress Session of the 16th Euromicro Conference on Real-Time Systems*. Catania, Italy: Steve Goddard, 2004;5-9.
3. Cortex-A5. `developer.arm` URL: <https://developer.arm.com/Processors/Cortex-A5>
4. Processeurs Intel® Core™ de 14^e génération pour PC de bureau // `intel.fr` URL: <https://www.intel.fr/content/www/fr/fr/products/docs/processors/core/core-14th-gen-desktop-brief.html>
5. Antonov A.A., Klyuchev A.O., Komar M.S., Kustarev P.V., Kucheryavj E.A., Molchanov D.A., Petrov V.I., Platonov A.E. Development of a multiple access protocol for processors with multi-level caching // *Scientific and Technical Bulletin of Information Technologies, Mechanics and Optics*. 2015;3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-protokola-mnozhestvennogo-dostupa-dlya-protessorov-s-mnogourovnevnyh-keshirovaniem>. (In Russ)
6. Measuring the size of the cache line empirically // `lemire` URL: <https://lemire.me/blog/2023/12/12/measuring-the-size-of-the-cache-line-empirically/>
7. Bruce Jacob, Spencer W. Ng, David T. Wang, CHAPTER 1 - An Overview of Cache Principles, Editor(s): *Memory Systems*, Morgan Kaufmann, 2008, Pages 57-77, ISBN 9780123797513.
8. Eze, Val & Eze, Martin & Edozie, Enerst & Eze, Esther. (2023). Design and Development of Effective Multi-Level Cache Memory Model. *International Journal of Recent Technology and Applied Science (IJORTAS)*. 5. 54-64. 10.36079/lamintang.ijortas-0502.515.
9. IBM's New System Z CPU Offers 40 Percent More Performance per Socket, Integrated AI // `extremetech` URL: <https://www.extremetech.com/computing/326402-ibms-new-system-z-cpu-offers-40-percent-more-performance-per-socket-integrated-ai>

10. Cache Memory in Computer Organization // geeksforgeeks URL: <https://www.geeksforgeeks.org/cache-memory-in-computer-organization/>.
11. Jouppi, Norman. (1998). Improving Direct-Mapped Cache Performance by the Addition of a Small Fully-Associative Cache Prefetch Buffers.. Conference Proceedings - Annual Symposium on Computer Architecture. 18. 388-397. 10.1109/ISCA.1990.134547.
12. Garzón, Esteban & Hanhan, Robert & Lanuzza, Marco & Teman, Adam & Yavits, Leonid. (2024). FASTA: Revisiting Fully Associative Memories in Computer Microarchitecture. IEEE Access. PP. 10.1109/ACCESS.2024.3355961.
13. Guocong Quan, Atilla Eryilmaz, Jian Tan, Ness Shroff. Prefetching and caching for minimizing service costs: Optimal and approximation strategies, Performance Evaluation, 2021;145:102149, ISSN 0166-5316
14. Function core::arch::x86_64::mm_prefetch //doc.rust-lang URL: https://doc.rust-lang.org/beta/core/arch/x86_64/fn_mm_prefetch.html.
15. Filisov D.A. Optimization strategies for high-load applications: improving overall performance // Bulletin of Science. 2023. №7 <https://cyberleninka.ru/article/n/strategii-optimizatsii-dlya-vysokonagruzhennyh-prilozheniy-povyshenie-obschey-proizvoditelnosti>. (In Russ)
16. Wu, HT., Cho, HH., Wang, SJ. *et al.* Intelligent data cache based on content popularity and user location for Content Centric Networks. *Hum. Cent. Comput. Inf. Sci.* 9, 44 (2019). <https://doi.org/10.1186/s13673-019-0206-5>.
17. Al'-zgul' Mosab Basam. Hybrid algorithms in object caching systems. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2008. №4-39. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/gibridnye-algoritmy-v-sistemah-keshirovaniya-obektov>. (In Russ)
18. Locality of Reference and Cache Operation in Cache Memory//turbopages URL: <https://www.geeksforgeeks.org/locality-of-reference-and-cache-operation-in-cache-memory/>.
19. YUrushkin M. V., Semionov S. G. Repositioning matrices to a block view while minimizing the use of additional memory . *News of universities. The North Caucasus region. Series: Technical Sciences*. 2017. №3 (195). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/pererazmeschenie-matrits-k-blochnomu-vidu-s-minimizatsiey-ispolzovaniya-dopolnitelnoy-pamyati>. (In Russ)
20. LRU Cache — A Cache Data Structure // medium URL: <https://ogroetz.medium.com/lru-cache-a-cache-data-structure-1fab0d948e94>.
21. GCC, the GNU Compiler Collection // gcc.gnu URL: <https://gcc.gnu.org/>.
22. Chapter 25. Profiling memory accesses with perf mem//access.redhat URL: https://access.redhat.com/documentation/enus/red_hat_enterprise_linux/8/html/monitoring_and_managing_system_status_and_performance/
23. Egunov V.A. Cache optimization of the process of calculating eigenvalues on parallel computing systems. *Caspian Journal: Management and High Technologies*. 2019;1 (45):154-163. (In Russ)
24. Egunov V.A. On the effect of cache memory on the effectiveness of software implementation of basic linear algebra operations. *Caspian Journal: Management and High Technologies*. 2018;3: 88-96.
25. Egunov V.A., Kravec A.G. A method for improving the caching strategy for computing systems with shared memory. *Software Engineering*. 2023; 14(7):329-338. - DOI: 10.17587/prin.14.329-338. (In Russ)
26. Kravec A.G., Egunov V.A. The Software Cache Optimization-Based Method for Decreasing Energy Consumption of Computational Clusters. *Energies*. 2022;15(20):16 (October-2) [*Special issue «Smart Energy and Sustainable Environment»*]. Article 7509. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15207509>. (In Russ)

Сведения об авторах:

Егунов Виталий Алексеевич, кандидат технических наук, доцент, кафедра ЭВМ и систем; vegunov@mail.ru

Шабаловский Владимир Андреевич, магистрант, кафедра ЭВМ и систем; shabalovsky.v@mail.ru

Information about authors:

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

Vladimir A. Shabalovsky, Master Student, Computers and Systems Department; shabalovsky.v@mail.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 05.03.2024.

Одобрена после рецензирования/ Revised 09.04.2024.

Принята в печать/Accepted for publication 09.04.2024.

**Методика выявления аномалий в данных оценки кибератак с использованием
Random Forest и градиентного бустинга в машинном обучении**

А.С. Кечеджиев, О.Л. Цветкова, А.И. Дубровина
Донской государственный технический университет,
344002, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1, Россия

Резюме. Цель. Исследование направлено на обнаружение аномалий в данных с использованием моделей машинного обучения, в частности случайного леса и градиентного бустинга, для анализа активности сети и обнаружения кибератак. Тема исследования является актуальной, поскольку кибератаки становятся все более сложными и изощренными. Разработка эффективных методов обнаружения аномалий и защиты от киберугроз становится приоритетной задачей для организаций. **Метод.** Исследование основано на методах комплексного анализа, начиная с разработки алгоритма тестирования и загрузки данных для обучения и тестирования. Исследование проводится с помощью двух алгоритмов машинного обучения: Random Forest и градиентного Бустинга. Процесс включает в себя анализ важных признаков, визуализацию решений, оценку производительности моделей и анализ матриц ошибок для каждой категории атак. **Результат.** Модель Random Forest показала точность около 94% при использовании топ-10 важных признаков. Графическое представление решений позволяет понять, как модель принимает решения на основе признаков. Модель градиентного бустинга Xgboost достигла высокой точности и достоверности результатов. В классификационном отчете приводится подробное описание производительности моделей по каждой категории. **Вывод.** Проведенная работа представляет собой результат комплексного анализа модели машинного обучения, предназначенной для обнаружения кибератак. Она включает в себя несколько ключевых шагов и методов, позволяющих оценить эффективность модели, выделить наиболее важные признаки и проанализировать ее производительность для различных категорий атак.

Ключевые слова: аномалия в данных, машинное обучение, алгоритм Random Forest (случайный лес), модель градиентного бустинга

Для цитирования: А.С. Кечеджиев, О.Л. Цветкова, А.И. Дубровина. Методика выявления аномалий в данных оценки кибератак с использованием Random Forest и градиентного бустинга в машинном обучении. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2024; 51(3):72-85. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-3-72-85

**Methodology for detecting anomalies in cyber attack assessment data using Random Forest
and Gradient Boosting in machine learning**

A.S. Kechedzhiev, O.L. Tsvetkova, A.I. Dubrovina
Don State Technical University,
1 Gagarina Square, Rostov-on-Don, 344002, Russia

Abstract. Objective. The research aims to detect anomalies in data using machine learning models, in particular random forest and gradient boosting, to analyze network activity and detect cyberattacks. The research topic is relevant as cyber attacks are becoming increasingly complex and sophisticated. Developing effective methods for detecting anomalies and protecting against cyber threats is becoming a priority for organizations. **Method.** The research is carried out using two machine learning algorithms: Random Forest and gradient boosting. The process includes analyzing important metrics, visualizing solutions, evaluating the performance of each model, and analyzing error matrices for attack categories. **Result.** The Random Forest model

showed an accuracy of about 94% when using the top 10 important features. The graph provides insight into how the model makes decisions based on features. The Xgboost gradient boosting model achieved high accuracy and reliability of results. The report provides a description of the model's performance for each category. **Conclusion.** The work done is the result of a comprehensive analysis of a machine learning model designed to detect cyberattacks. It includes several key steps and methods that allow us to evaluate the effectiveness of the model, identify important features, and analyze performance for various attacks.

Keywords: data anomaly, machine learning, Random Forest algorithm, gradient boosting model

For citation: A.S. Kechedzhiev, O.L. Tsvetkova, A.I. Dubrovina. Methodology for detecting anomalies in cyber attack assessment data using Random Forest and Gradient Boosting in machine learning. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2024; 51(3):72-85. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-3-72-85

Введение. Аномалии в контексте машинного обучения представляют собой необычные или редкие события, отличающиеся от ожидаемого или типичного поведения данных. Они могут возникать из-за ошибок в данных, необычных ситуаций или проблем в процессе сбора данных. Аномалии могут проявляться в различных областях, таких как финансы (мошеннические транзакции), телекоммуникации (потеря сигнала), медицина (выявление заболеваний) и многие другие. Аномалии могут возникать по разным причинам, включая технические сбои, мошенничество, нештатные ситуации. Их обнаружение важно для обеспечения информационной безопасности, выявления проблем в системах, предотвращения финансовых потерь.

Использование методов машинного обучения для обнаружения аномалий позволяет автоматизировать процесс выявления необычных паттернов в данных [1]. Авторы предлагают модификацию алгоритма K-Means, которая обеспечивает повышение эффективности алгоритма при выявлении аномалий при обработке потоковых данных в реальном времени [2]. Следующая статья предлагает гибридное использование двух методов машинного обучения для выявления аномалий сетевого трафика [3]. Авторы утверждают, что данный алгоритм позволяет снизить количество ложноположительных срабатываний, повысить точность обнаружения и качество обслуживания. Известны научные работы, посвященные решению задачи обнаружения аномального поведения пользователей в системах на основе методов машинного обучения [4, 5]. В других работах авторы проводят исследование возможности обнаружения аномального поведения сетевого трафика на основе статистических методов при помощи машинного обучения и выполнения динамической аутентификации пользователей на основе анализа работы с компьютерной мышью [6, 7].

Постановка задачи. Random Forest и градиентный бустинг являются алгоритмами обучения с учителем, которые строят несколько деревьев решений и объединяют их для принятия окончательного решения. В контексте обнаружения аномалий Random Forest и градиентный бустинг могут использоваться для классификации точек данных как «нормальные» или «аномальные» на основе их признаков, что позволяет выявлять потенциальные аномалии в данных [8]. В настоящей статье приведены результаты исследования на примере двух алгоритмов машинного обучения.

Первый, рассматриваемый алгоритм машинного обучения — Random Forest (случайный лес), используется для решения задач классификации и регрессии. Он основан на идее комбинирования нескольких деревьев решений для получения более точных и стабильных прогнозов. Во время обучения создается множество деревьев решений и выполняется усреднение их результатов для получения более точного прогноза. Каждое дерево строится на основе подвыборки данных (bootstrap sample) и использует случайный набор признаков для разделения узлов дерева. Это способствует разнообразию деревьев в лесу, что помогает избежать переобучения и повышает обобщающую способность модели.

Второй алгоритм машинного обучения - модель градиентного бустинга, построен на идее комбинирования нескольких слабых моделей (например, деревьев решений) для

создания сильной ансамблевой модели. Основная идея заключается в последовательном добавлении новых моделей к ансамблю с фокусом на исправлении ошибок, сделанных предыдущими моделями [9]. Градиентный бустинг обучает новые модели таким образом, чтобы они исправляли недочеты или остатки предыдущих моделей. Он использует градиентный спуск для минимизации функции потерь, то есть для нахождения направления, в котором нужно изменить модель, чтобы улучшить ее прогнозы [10, 11].

Методы исследования. В рамках исследования будет использован набор данных, подходящий для задачи обнаружения аномалий. Сначала данные будут предварительно обработаны, включая процессы такие как очистка от выбросов, заполнение пропущенных значений и масштабирование признаков при необходимости. Затем данные будут поделены на обучающую и тестовую выборки. Далее каждый из алгоритмов будет обучен на обучающей выборке. Для Random Forest будет создано несколько деревьев решений на основе подвыборок данных, а для модели градиентного бустинга будут последовательно добавлены новые модели с фокусом на исправлении ошибок предыдущих моделей. После обучения каждая модель будет протестирована на тестовой выборке. Будут оценены и сравнены их производительность и качество предсказаний, основываясь на метриках, таких как точность, полнота, F1-мера.

Обсуждение результатов. 1. Разработка алгоритма проведения тестирования.

В ходе исследования проведен анализ данных, используемых для обучения моделей машинного обучения с целью обнаружения кибератак. Данные представляют набор разнообразных параметров, связанных с сетевой активностью, таких как длительность соединения, тип протокола, состояние соединения, количество пакетов, переданных и полученных, размер переданных и полученных байтов, скорость передачи данных, параметры, связанные с конечной точкой соединения и другие. В данных присутствуют целевые метки, указывающие на наличие или отсутствие атаки в конкретном сценарии, они являются ключевыми для обучения модели машинного обучения на определение аномалий и выявление атак на сетевую инфраструктуру. Каждая строка в исходном файле обучения представляет отдельный экземпляр данных, содержащий значения параметров и метки, которые используются для обучения модели на основе машинного обучения. Данные будут проанализированы, обработаны и использованы для создания моделей, способных определять потенциальные кибератаки на основе предоставленных параметров сетевой активности. На рис. 1 представлен алгоритм действий, который был реализован в процессе работы над статьей.



Рис. 1. Алгоритм действий при выполнении тестирования

Fig. 1. Algorithm of actions when performing testing

2. Загрузка данных для обучения и тестирования. Код представляет собой загрузку данных из файлов CSV в два различных набора данных: training и testing. При этом используется библиотека Pandas для чтения данных из указанных файлов.

После загрузки каждого набора данных код выводит информацию об их форме, то есть количество строк (наблюдений) и столбцов (признаков): Training-set содержит

82332 тысячи строк и 45 столбцов; Testing-set содержит 89838 тысячи строк и 45 столбцов.

Далее идет проверка на совпадение столбцов по названию и количеству. Когда все столбцы совпадают, нужно объединить тестовый и обучающийся наборы по оси строк создавая один data frame. Результат приведен на рис. 2 (фрагмент отображения data frame).

	dur	proto	servic	state	spkts	dpkts	sbytes	dbytes	rate	sttl	.
0	0.00001	1	udp	-	INT	2	0	496	0	90909.0902	254
1	0.00000	8	udp	-	INT	2	0	1762	0	125000.000	254
2	0.00000	5	udp	-	INT	2	0	1068	0	200000.005	254
3	0.00000	6	udp	-	INT	2	0	900	0	166666.660	254
4	0.00001	0	udp	-	INT	2	0	2126	0	100000.005	254

5 rows x 44 columns

Рис. 2. Фрагмент отображения data frame
Fig. 2. Data frame display fragment

Каждый столбец содержит определенное количество ненулевых значений (Non-Null Count). Некоторые столбцы имеют недостающие значения (например, dmean, trans_depth, attack_cat, label и другие), так как их Non-Null Count меньше общего количества записей (172169 вместо 172170), что указывает на наличие пропущенных данных.

Эти данные содержат различные числовые значения (с плавающей запятой и целочисленные) и категориальные данные (тип object). Это может быть важным для предварительной обработки данных, так как некоторые модели машинного обучения могут требовать числовые данные, а не категориальные. Также важно обратить внимание, что столбец label содержит числовые значения (float64), которые могут представлять целевую переменную для модели машинного обучения, а столбец attack_cat содержит категории атак. Возможно, что столбец attack_cat является целевой переменной для задачи классификации. Далее необходимо получить все уникальные виды атак.

Получим массив всех видов атак в столбце attack_cat. Массив атак: array(['Normal', 'Reconnaissance', 'Backdoor', 'DoS', 'Exploits', 'Analysis', 'Fuzzers', 'Worms', 'Shellcode', 'Generic', nan], dtype=object). Так же необходимо провести кодирование категориальных переменных в числовые коды, что может помочь в обработке данных для дальнейшего использования в моделировании. Из приведенных на рис. 3 данных видно, что столбцы proto, service, state были преобразованы в числовые значения.

dur	proto	service	state	spkts	dpkts	sbytes	dbytes	rate	sttl	...	ct_dst_sport_ltm	ct_dst_src_ltm	is_fto_log	
0	0.000011	119	0	5	2	0	496	0	90909.0902	254	...	1.0	2.0	0
1	0.000008	119	0	5	2	0	1762	0	125000.0003	254	...	1.0	2.0	0
2	0.000005	119	0	5	2	0	1068	0	200000.0051	254	...	1.0	3.0	0
3	0.000006	119	0	5	2	0	900	0	166666.6608	254	...	1.0	3.0	0
4	0.000010	119	0	5	2	0	2126	0	100000.0025	254	...	1.0	3.0	0

Рис. 3. Фрагмент отображения data frame
Fig. 3. Data frame display fragment

3. Визуализация категорий атак. Получим визуализацию категорий атак, основанных на столбце attack_cat, в случаях, где метка label равна 1 (то есть, где атака обнаружена). На рис. 4 изображена диаграмма значений для категорий атак из столбца attack_cat, где метка label равна 1 (то есть, когда обнаружена атака). Каждое значение показывает количество случаев каждой категории атаки в этом датасете. Вот что означает каждое из этих значений:

- Exploits: 27292 случая атак, которые классифицированы как эксплуатации уязвимостей.
- Generic: 18871 случай, где использованы общие методы атаки.
- Fuzzers: 15222 случая, связанные с фаззингом (грубой проверкой на входные данные).
- DoS: 9537 случаев атак типа «Отказ в обслуживании» (Denial of Service).
- Reconnaissance: 8350 случаев, где проводилась разведка.
- Analysis: 1745 случаев анализа уязвимостей или сети.

- Backdoor: 1420 случаев использования задней двери для доступа к системе.
- Shellcode: 916 случаев использования shellcode для атаки.
- Worms: 107 случаев, где использовались черви для атаки.
- Normal: 0 случаев, которые были классифицированы как нормальная активность.

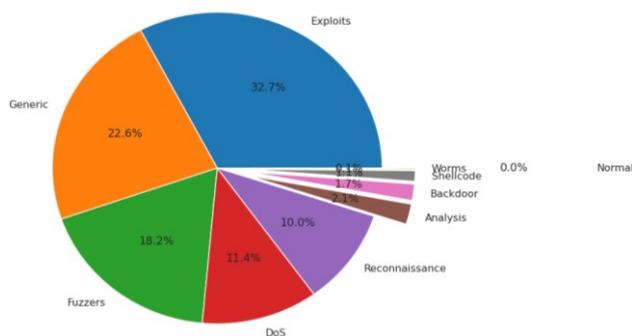


Рис. 4. Визуализация категорий атак

Fig. 4. Visualization of attack categories

4. Разделение данных для обучающей и тестовой сборки. Выполняется создание матрицы признаков x , удаление столбцов `attack_cat` и `label` из исходных данных. Это станет набором признаков для обучения модели. Массив меток y из столбца `label` будет целевой переменной для обучения модели. Разделение данных на обучающий и тестовый наборы: `test_size=0.3` означает, что 30% данных будут выделены для тестирования, а `random_state=11` устанавливает случайное начальное значение для разделения данных, обеспечивая воспроизводимость. Вывод информации о размере данных обучающего и тестового наборов после разделения:

- `X_train` shape: (120519, 42) — обучающий набор данных содержит 120519 строк (наблюдений) и 42 столбца (признаков);
- `y_train` shape: (120519,) — количество меток (целевых значений) в обучающем наборе данных. У нас есть 120519 меток для соответствующих строк в обучающем наборе;
- `X_test` shape: (51651, 42) — тестовый набор данных содержит 51651 строк (наблюдений) и также 42 столбца (признаков), что соответствует обучающему набору;
- `y_test` shape: (51651,) — количество меток (целевых значений) в тестовом наборе данных. У нас есть 51651 меток для соответствующих строк в тестовом наборе.

5. Модель дерева решений. Данный алгоритм использует модель решающего дерева (Decision Tree Classifier) для создания набора критериев для обнаружения кибератак. Он также выполняет поиск по сетке параметров (grid search) для оптимизации модели с целью максимизации метрики `recall` (полноты). `Recall` должен быть высоким, чтобы создать первый уровень защиты и обнаруживать как можно больше кибератак.

По результатам поиска по сетке наилучшие параметры для модели решающего дерева: Best parameters: {'criterion': 'gini', 'max_depth': 2, 'min_samples_leaf': 1, 'min_samples_split': 2}

Best recall score: 1.0

Критерий разделения: Gini (criterion='gini')

Максимальная глубина дерева: 2 (max_depth=2)

Минимальное количество выборок в листе: 1 (min_samples_leaf=1)

Минимальное количество выборок для разделения: 2 (min_samples_split=2)

Также лучший показатель `recall`, достигнутый вовремя кросс-валидации, составляет 1.0 (или 100%). Это означает, что модель на обучающих данных идеально справилась с обнаружением положительных классов (атак) без ошибок ложного отрицания (false negatives). Важно отметить, что идеальный показатель `recall` на обучающем наборе не всегда гарантирует такие же идеальные результаты на новых данных. Поэтому необходимо

провести тестирование модели на отдельном тестовом наборе, чтобы убедиться в ее обобщающей способности.

6. Визуализация правил. Фрагмент, кода представляет процесс визуализации правил и структуры решающего дерева, построенного моделью машинного обучения. Это нужно для понимания внутренней логики модели, интерпретации правил, принятых деревом решений, и визуального анализа структуры дерева. Такой анализ помогает увидеть, как модель делает прогнозы и какие признаки оказывают наибольшее влияние на принятие решений. На рис. 5 изображено текстовое представление дерева правил.

```

    ::::::> The RULES FOR HIGH RECALL RATE <:::::
    |-- sttl <= 61.00
    |   |-- sinpkt <= 0.00
    |       |-- class: 1
    |       |-- sinpkt > 0.00
    |           |-- class: 0
    |-- sttl > 61.00
    |   |-- synack <= 0.04
    |       |-- class: 1
    |       |-- synack > 0.04
    |           |-- class: 1
    
```

Рис. 5. Текстовое представление дерева правил
Fig. 5. Textual representation of the rule tree

Графическое представление части правил, которые модель решающего дерева использовала для предсказания классов, изображено на рис. 6. Модель решающего дерева построила дерево принятия решений, которое использует различные характеристики данных для классификации каждого экземпляра.

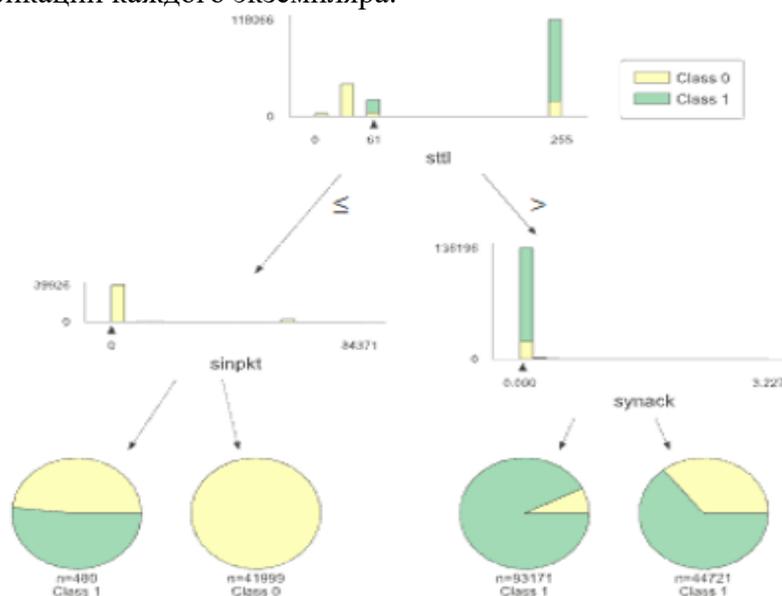


Рис. 6. Графическое представление дерева правил
Fig. 6. Graphical representation of the rule tree

Интерпретация правил:

Если *sttl* (Time to Live) меньше или равно 61.00:

Если *sinpkt* (Interpacket Arrival Time) меньше или равен 0.00, модель предсказывает класс 1 (положительный класс).

Если *sinpkt* больше 0.00, модель предсказывает класс 0 (отрицательный класс).

Если *sttl* больше 61.00:

Если *synack* (SYN ACK Service Time) меньше или равен 0.04, модель предсказывает класс 1.

Если *synack* больше 0.04, модель также предсказывает класс 1. Например, если у нас есть новые данные, модель использует эти правила, чтобы определить, какой класс (1 или 0) должен быть присвоен каждому экземпляру на основе значений его характеристик (*sttl*, *sinpkt*, *synack* и т.д.).

7. Фильтрация данных на предмет потенциальных атак. Данная часть кода фильтрует тестовый набор данных `X_test` на основе некоторых правил и отображает процент данных, которые соответствуют этим правилам.

```
X_test = X_test.reset_index(drop=True)
rules= "(sttl <= 61.00 & sinpkt<= 0.00) | (sttl > 61.00)"
ind = X_test.query(rules).index
X_test_2 = X_test.loc[ind,: ]
y_test_2 = y_test[ind]
print(X_test.shape)
print (X_test_2. shape)
print ("filtered data», (1- np.round(X_test_2.shape[0] / X_test.shape[0],2))*100, "%")
```

Из результатов кода видно следующее: исходный размер тестового набора данных `X_test` составляет (77302, 42), что означает 77302 строк и 42 столбца.

После применения заданных правил и фильтрации данных, размер `X_test_2` составляет (59425, 42), что означает, что после фильтрации осталось 59425 строк и 42 столбца. Процент отфильтрованных данных составляет 23.0%. Это значение рассчитывается как отношение количества строк в отфильтрованном наборе `X_test_2` к общему количеству строк в исходном тестовом наборе `X_test`. Это указывает на то, что после применения заданных правил и фильтрации данных остается только 23% от исходного тестового набора. Оставшиеся данные соответствуют заданным условиям `rules`.

8. Оценка производительности модели с помощью библиотеки Scikit-learn. Функция `model_evaluation` предназначена для оценки производительности модели машинного обучения. Она принимает модель в качестве входного аргумента `model`, обучает ее на обучающих данных, предсказывает значения на тестовых данных и оценивает несколько ключевых метрик (рис. 7).

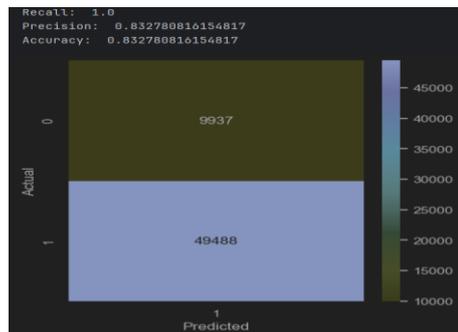


Рис. 7. Оценка производительности модели
Fig. 7. Model performance evaluation

С учетом этих данных можно сделать вывод, что модель достаточно хорошо выявляет реальные положительные случаи (`Recall = 1.0`) и демонстрирует высокую общую точность (Аccuracy около 83%), что может быть удовлетворительным для многих задач классификации. Однако, стоит обратить внимание на `Precision` в 83%, чтобы оценить, насколько уверенно модель классифицирует положительные случаи. `Precision` равное 83% означает, что из всех случаев, которые модель отметила, как положительные, около 83% действительно являются таковыми. Тем не менее, решение о том, является ли это хорошим или плохим результатом, зависит от контекста конкретной задачи. В некоторых случаях, где критически важно минимизировать ложноположительные результаты, `Precision` 83% может быть недостаточно высоким. Например, в медицинских задачах неверное обозначение заболевания как отсутствующее может быть более критичным, чем ложное обозначение здорового человека как больного. Поэтому оценка `Precision` требует анализа в контексте конкретной задачи и баланса между минимизацией ложноположительных и ложноотрицательных результатов.

9. Модель машинного обучения Random Forest. Создадим модель случайного леса с заданным `random_state`, что обеспечивает воспроизводимость результатов. Получим

метрики оценки производительности модели, такие как recall, precision, accuracy и матрицу ошибок (confusion matrix) с помощью графика (рис. 8).

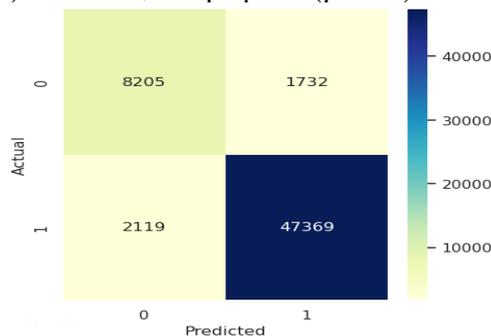


Рис. 8. Матрица ошибок

Fig. 8. Error matrix

Перенесем в переменную results производительность случайного леса, которая нам интересна для сравнения с другими моделями или для дальнейшего анализа.

Получим: Recall: 0.9571815389589395

Precision: 0.9647257693326001

Accuracy: 0.9351956247370635

Данные метрики указывают на хорошую производительность модели на нашем тестовом наборе данных. Высокий показатель Recall является особенно важным в задачах обнаружения атак, поскольку он показывает, что модель хорошо выявляет реальные атаки, минимизируя ложно отрицательные результаты.

10. Визуализация правил, присутствующих в дереве RandomForest. Получаем вывод в текстовом представлении правил, использованных 100-м деревом в нашей модели случайного леса для классификации данных. Это позволяет нам понять, какие признаки и значения используются в этом конкретном дереве для принятия решений. Текстовое представление части дерева представлено на рис. 9.

```
|--- dpkts <= 0.50
|   |--- ct_srv_src <= 2.50
|   |   |--- sbytes <= 53.00
|   |   |   |--- sinpkt <= 30000.02
|   |   |   |   |--- sbytes <= 26.00
|   |   |   |   |   |--- class: 1.0
|   |   |   |   |   |--- sbytes > 26.00
|   |   |   |   |   |   |--- class: 0.0
|   |   |   |   |--- sinpkt > 30000.02
|   |   |   |   |   |--- class: 0.0
|   |   |   |--- sbytes > 53.00
|   |   |   |   |--- rate <= 0.11
|   |   |   |   |   |--- sbytes <= 62.50
|   |   |   |   |   |   |--- class: 1.0
|   |   |   |   |   |   |--- sbytes > 62.50
```

Рис. 9. Текстовое представление части дерева

Fig. 9. Text representation of a part of the tree

Каждый узел в дереве представляет собой условие для разделения данных, а листовые узлы содержат прогнозируемое значение. Имеются некоторые ключевые элементы в этом текстовом представлении:

- Узлы дерева содержат условия, например, $dpkts \leq 0.50$ или $sbytes > 62.50$;
- Если условие истинно, переходите к левому поддереву, если ложно — к правому;
- Листовые узлы содержат значения (в данном случае class: 1.0 или class: 0.0), которые являются прогнозируемым классом или значением.

Это дает представление о том, как модель принимает решения на основе различных признаков.

11. Оценка с помощью модели градиентного бустинга библиотеки Xgboost. График производительности модели машинного обучения представлен на рис. 10. Метрики Recall, Precision и Accuracy являются показателями производительности модели машинного обучения.

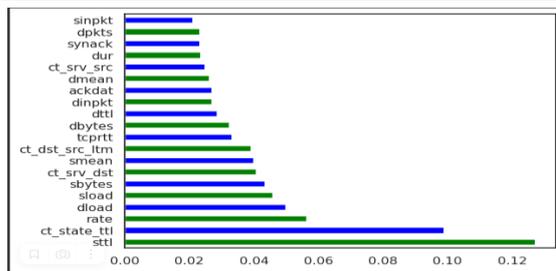


Рис. 14. Диаграмма для двадцати наиболее важных признаков из модели случайного леса
Fig. 14. Plot for the top twenty features from the random forest model

Затем модель случайного леса обучается на этих выбранных признаках, а точность (ассигасу) модели оценивается на тестовом наборе данных. Полученное значение точности ($acc = 0.9443869498848672$). Ассигасу говорит о том, что модель, использующая только эти 10 самых важных признаков, правильно классифицирует примерно 94.43% тестовых данных. Это предоставляет информацию о том, что эти 10 признаков, согласно важности, достаточно информативны для модели для высокого уровня предсказательной способности.

14. Обучение модели Random Forest с категорией атаки в качестве меток прогнозирования. Значение точности (ассигасу) модели случайного леса, равное 0.824, означает, что модель правильно предсказывает категории атак в 82.4% случаев на тестовом наборе данных. Это показывает общую эффективность модели в предсказании категорий атак. График, который отображается с помощью `sns.heatmap`, представляет собой матрицу ошибок (confusion matrix) (рис.15), он позволяет оценить, сколько объектов каждого класса было предсказано правильно или ошибочно. Визуализация содержит информацию о результатах предсказаний для разных категорий атак, где по диагонали матрицы расположены правильные предсказания, а вне диагонали — ошибочные.

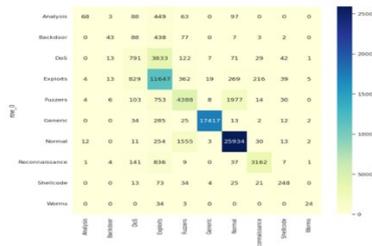


Рис. 15. Матрица ошибок
Fig. 15. Error matrix

15. Классификационный отчет. Классификационный отчет показывает метрики точности (precision), полноты (recall) и F1-меры для каждой категории атак, а также для среднего (macro avg) и взвешенного (weighted avg) усредненных значений этих метрик по всем классам (рис. 16).

	precision	recall	f1-score	support
Analysis	0.76	0.09	0.16	768
Backdoor	0.52	0.07	0.12	658
DoS	0.38	0.16	0.23	4909
Exploits	0.63	0.87	0.73	13403
Fuzzers	0.66	0.60	0.63	7283
Generic	1.00	0.98	0.99	17790
Normal	0.91	0.93	0.92	27814
Reconnaissance	0.91	0.75	0.82	4198
Shellcode	0.63	0.59	0.61	418
Worms	0.69	0.39	0.50	61
accuracy			0.82	77302
macro avg	0.71	0.54	0.57	77302
weighted avg	0.82	0.82	0.81	77302

Рис. 16. Классификационный отчет
Fig. 16. Classification report

Эти метрики дают представление о производительности модели машинного обучения для каждой конкретной категории атак и в целом по всем категориям.

Метрики можно интерпретировать следующим образом:

- Precision (точность): это доля правильно предсказанных положительных случаев из всех предсказанных положительных случаев. Например, для категории Normal

precision равен 0.91, что означает, что 91% из всех предсказанных как Normal действительно являются Normal;

- Recall (полнота): это доля правильно предсказанных положительных случаев из всех истинных положительных случаев. Например, для категории Normal recall равен 0.93, что означает, что модель поймала 93% всех реальных Normal случаев;
- F1-score (F1-мера): это среднее гармоническое между точностью и полнотой. Это полезная метрика для сбалансированной оценки производительности модели, особенно при несбалансированных классах.

Значения precision, recall и F1-меры для каждой категории атак показывают, насколько хорошо модель справляется с предсказанием этой конкретной категории. Рассмотрим более точно матрицы ошибок каждой категории атак с использованием `multilabel_confusion_matrix`. Этот блок кода визуализирует матрицы ошибок для каждой категории атаки из тестового набора данных. Каждая матрица ошибок содержит четыре различных значения:

- True Negative (TN) Число в левом верхнем углу. Это количество образцов, которые были правильно предсказаны как отсутствующие для данной категории атаки;
- False Positive (FP): Число в верхнем правом углу. Это случаи, когда модель неправильно предсказывает наличие категории атаки, когда ее на самом деле нет;
- False Negative (FN): Число в правом нижнем углу. Оно показывает, сколько экземпляров данной категории атаки были неправильно предсказаны как отсутствующие (ложноотрицательные результаты);
- True Positive (TP): Число находится в нижнем левом углу. Это случаи, когда модель правильно предсказывает наличие категории атаки, и она действительно присутствует.

Каждая матрица ошибок показывает количество верных и неверных прогнозов для определенной категории атаки (рис. 17, 18).

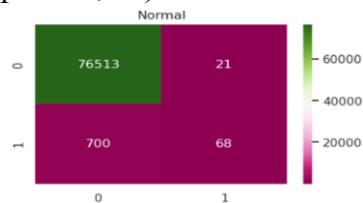


Рис. 17. Нормальное состояние без атак
 Fig. 17. Normal state without attacks

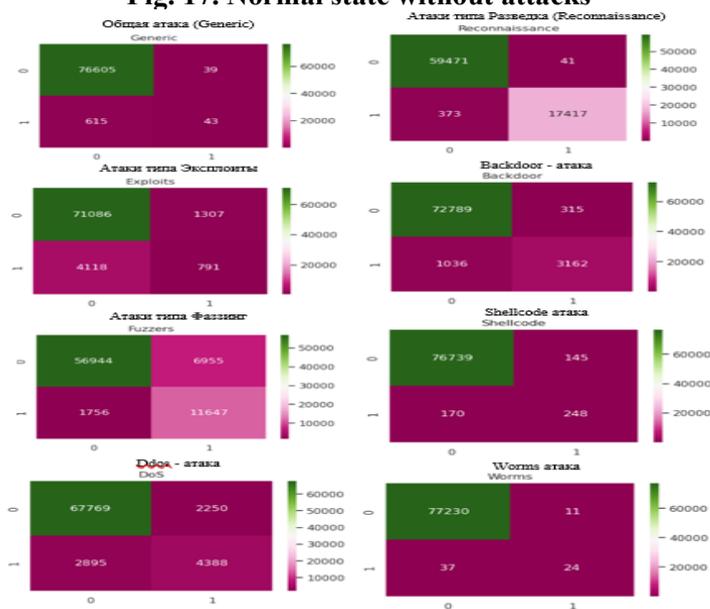


Рис. 18. Состояния при различных видах атак
 Fig. 18. States for different types of attacks

Этот процесс полезен для понимания того, где модель делает ошибки в предсказаниях для каждой категории атак. Красные ячейки на диагонали матрицы показывают количество правильно предсказанных случаев, тогда как некоторые другие ячейки могут указывать на ложные срабатывания или пропущенные атаки. Каждая матрица соответствует категории атаки из набора данных, и они построены итеративно для всех категорий. Это позволяет быстро оценить производительность модели по каждой категории атак.

Вывод. Прделанная работа представляет собой комплексный анализ модели машинного обучения, предназначенной для обнаружения кибератак. Она включает в себя несколько ключевых шагов и методов, позволяющих оценить эффективность модели, выделить наиболее важные признаки и проанализировать ее производительность для различных категорий атак.

Оценка и анализ данных: изучение корреляций между переменными позволило выявить важные признаки, связанные с кибератаками; использование модели случайного леса для ранжирования признаков позволило выделить топ-10 наиболее значимых признаков для модели.

Оценка модели: обучение модели случайного леса на этих топ-10 признаках показало высокий уровень точности (около 94%), указывая на их информативность для предсказаний модели.

Интерпретация модели: визуализация дерева решений на основе этих 10 признаков помогла понять, как модель принимает решения и какие признаки оказывают большее влияние на классификацию.

Оценка на категории атак: модель обучалась и тестировалась с использованием категорий атак, показав приемлемую точность в предсказании типов атак (около 82%); анализ матриц ошибок для каждой категории атаки дал представление о том, где модель делает ошибки в предсказаниях для конкретных типов атак, что помогает улучшить ее работу.

Метрики оценки модели: классификационный отчет дал детальное представление о производительности модели по каждой категории атаки: precision, recall и F1-мера.

Библиографический список:

1. Гайдук, К. А. К вопросу о реализации алгоритмов выявления внутренних угроз с применением машинного обучения / К. А. Гайдук, А. Ю. Исхаков // Вестник СибГУТИ. – 2022. – Т. 16, № 4. – С. 80-95. – DOI 10.55648/1998-6920-2022-16-4-80-95. – EDN SGBSIH.
2. Савицкий, Д. Е. Выявление аномалий при обработке потоковых данных в реальном времени / Д. Е. Савицкий, М. Е. Дунаев, К. С. Зайцев // International Journal of Open Information Technologies. – 2022. – Т. 10, № 6. – С. 70-76. – EDN IGAWAO.
3. Токарев, Д.М. Обнаружение аномалий на основе машинного обучения с использованием сочетания алгоритмов K-MEAN и SMO / Д.М. Токарев, М.Г. Городничев // Телекоммуникации и информационные технологии. – 2023. – Т. 10, № 1. – С. 5-13. – EDN ILCJZR.
4. Мельник М. В., Котенко И. В. Обнаружение аномального поведения пользователей и сущностей в контейнерных системах на основе методов машинного обучения // Информационная безопасность регионов России (ИБРР-2023) : XIII Санкт-Петербургская межрегиональная конференция. Материалы конференции, Санкт-Петербург, 25–27 октября 2023 года. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургское Общество информатики, вычислительной техники, систем связи и управления, 2023. – С. 97-98. – EDN QOBTZR.
5. Терских М.Г., Тишина Е.М. Обнаружение аномального поведения пользователей в журналах событий безопасности Windows с применением алгоритмов машинного обучения // Теория и практика современной науки. – 2018. – № 5(35). – С. 821-839. – EDN UYMTHC.
6. Сафин, А. Р. Обнаружение аномального поведения сетевого трафика на основе статистических методов при помощи машинного обучения / А. Р. Сафин // Информационная безопасность и защита персональных данных. Проблемы и пути их решения: Материалы XIII Межрегиональной научно-практической конференции, Брянск, 30 апреля 2021 года. – Брянск: Брянский государственный технический университет, 2021. – С. 228-231. – EDN UDRGDA.
7. Динамическая аутентификация пользователей на основе анализа работы с компьютерной мышью / А.В. Березникер, М.А. Казачук, И.В. Машечкин [и др.] // Вестник Московского университета. Серия 15: Вычислительная математика и кибернетика. – 2021. – № 4. – С. 3-16. – EDN XIQNIZ.

8. Попова, И.А. Обнаружение аномалий в наборе данных с помощью алгоритмов машинного обучения без учителя Isolation Forest и Local Outlier Factor / И.А. Попова // StudNet. – 2020. – Т. 3, № 12. – С. 1460-1470. – EDN XILRBX.
9. А. Асунсьон, Д. Ньюман. Репозиторий машинного обучения UCI, 2007.
10. М. М. Брейнинг, Х.-П. Кригель, Р. Т. Нг и Дж. Сандер. LOF: идентификация локальных выбросов на основе плотности. Запись ACM SIGMOD, 29(2):93-104, 2000.
11. Т. Ши, С. Хорват. Неконтролируемое обучение со случайными лесными предикторами. Журнал вычислительной и графической статистики, 15 (1): 118-138, март 2006.

References:

1. Gaiduk, K. A. On the implementation of algorithms for identifying internal threats using machine learning / K. A. Gaiduk, A. Yu. Iskhakov. *Bulletin of SibSUTI*. 2022;16(4): 80-95. DOI 10.55648/1998-6920-2022-16-4-80-95. - EDN SGBSIH. (In Russ)
2. Savitsky D. E., M. E. Dunaev, K. S. Zaitsev. Detecting anomalies in real-time streaming data processing. *International Journal of Open Information Technologies*. 2022;10(6):70-76. - EDN IGAWAO. (In Russ)
3. Tokarev D.M., Gorodnichev M. G. Machine Learning-Based Anomaly Detection Using a Combination of K-MEAN and SMO Algorithms. *Telecommunications and Information Technologies*. 2023;10(1):5-13. - EDN ILCJZP. (In Russ)
4. Melnik, M. V. Detection of Anomalous Behavior of Users and Entities in Container Systems Based on Machine Learning Methods / M. V. Melnik, I. V. Kotenko. Information Security of Russian Regions (IBRR-2023): XIII St. Petersburg Interregional Conference. Conference Proceedings, St. Petersburg, October 25-27, 2023. - St. Petersburg: St. Petersburg Society for Informatics, Computer Engineering, Communications and Control Systems, 2023; 97-98. - EDN QOBTZP. (In Russ)
5. Terskikh M.G., E.M. Tishina. Detecting abnormal user behavior in Windows security event logs using machine learning algorithms. *Theory and practice of modern science*. 2018; 5(35):821-839. - EDN UYMTHC(In Russ)
6. Safin, A.R. Detecting abnormal network traffic behavior based on statistical methods using machine learning / A.R. Safin // Information security and personal data protection. Problems and solutions: Proceedings of the XIII Interregional Scientific and Practical Conference, Bryansk, April 30, 2021. - Bryansk: Bryansk State Technical University, 2021;228-231. - EDN UDRGDA. (In Russ)
7. Dynamic user authentication based on the analysis of work with a computer mouse / A.V. Bereznik, M.A. Kazachuk, I.V. Mashechkin [et al.] *Bulletin of Moscow University. Series 15: Computational Mathematics and Cybernetics*. 2021;4:3-16. - EDN XIQNZ. (In Russ)
8. Popova I.A. Detecting anomalies in a dataset using unsupervised machine learning algorithms Isolation Forest and Local Outlier Factor StudNet. 2020;3(12):1460-1470. - EDN XILRBX. (In Russ)
9. Asuncion, D. Newman. UCI Machine Learning Repository, 2007.
10. M.M. Breunig, H.-P. Kriegel, R. T. Ng, and J. Sander. LOF: Density-based local outlier identification. ACM SIGMOD Record, 29(2):93–104, 2000.
11. T. Shi and S. Horvath. Unsupervised learning with random forest predictors. Journal of Computational and Graphical Statistics, 15(1):118–138, March 2006.

Сведения об авторах:

Кечеджиев Александр Сергеевич, магистрант кафедры «Вычислительные системы и информационная безопасность»; Kechedzhiev.alex@mail.ru

Цветкова Ольга Леонидовна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Вычислительные системы и информационная безопасность»; olga_cvetkova@mail.ru; ORCID: 0000-0003-4071-6313

Дубровина Ангелина Игоревна, ассистент кафедры «Вычислительные системы и информационная безопасность»; ministrelia69@yandex.ru; ORCID: 0009-0005-8562-9389

Information about authors:

Alexander S. Kechedzhiev, Master's Student, Department of Computer Systems and Information Security; Kechedzhiev.alex@mail.ru

Olga L. Tsvetkova, Cand. Sci. (Eng), Assoc. Prof., Assoc. Prof., Department of Computer Systems and Information Security; olga_cvetkova@mail.ru; ORCID: 0000-0003-4071-6313

Angelina I. Dubrovina, Assistant, Department of Computer Systems and Information Security; ministrelia69@yandex.ru; ORCID: 0009-0005-8562-9389

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/ Received 26.03.2024.

Одобрена после рецензирования / Reved 17.04.2024.

Принята в печать /Accepted for publication 17.04.2024.

Поиск оптимального пути построения системы защиты информации на основе марковских цепей

А. М. Конаков, И. И. Лившиц

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

Резюме. Цель. В рамках исследования рассмотрены основные аспекты построения системы защиты информации с точки зрения оптимизации затрачиваемых ресурсов и средств на обеспечение информационной безопасности. **Метод.** В данной предметной области рассмотрены возможности структурно – параметрических моделей и марковских цепей для выявления оптимальной линии построения многоуровневой системы защиты информации. Практика показывает, что построение и внедрение многоуровневой системы защиты информации снижает для злоумышленника возможность компрометации и несанкционированного доступа к защищаемой информации. **Результат.** Проведен анализ функциональных возможностей построенных моделей, как средства поиска оптимального пути построения системы защиты информации. Проведена оценка рисков безопасности информации в наиболее уязвимых точках процессов обеспечения информационной безопасности. Разработан и предложен подход к построению многоуровневой системы защиты информации с использованием функциональных возможностей структурно – параметрических моделей и марковских цепей. Сформулирована закономерность, позволяющая определить корректность построенной системы защиты информации на основе анализа и оценки рисков безопасности информации в наиболее уязвимых точках многоуровневой системы защиты информации, в процессе перехода из одного состояния в другое. **Вывод.** Обеспечение информационной безопасности с использованием методов математического моделирования представляет собой актуальный и ценный инструмент исходя из динамичности угроз и их неопределенности в различные промежутки времени. Разработка, апробация и внедрение новых подходов на основе моделирования позволяет спрогнозировать и предотвратить наиболее вероятные действия и шаги злоумышленника, тем самым снизив уровень риска и возможного ущерба по отношению к защищаемым информационным ресурсам и системам.

Ключевые слова: информационная безопасность, математические модели, оценка рисков, моделирование процессов

Для цитирования: А.М. Конаков, И.И. Лившиц. Поиск оптимального пути построения системы защиты информации на основе марковских цепей. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2024; 51(3):86-92. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-3-86-92

Finding the optimal way to build an information security system based on Markov chains

A.M. Konakov, I. I. Livshits

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

Abstract. Objective. The study examined the main aspects of building an information security system from the point of view of optimizing the resources spent and funds to ensure information security. **Method.** In this subject area, the possibilities of structural-parametric models and Markov chains for identifying the optimal line for constructing a multi-level information security system are considered. Practice shows that the construction and implementation

of a multi-level information security system reduces the possibility for an attacker of compromise and unauthorized access to protected information. **Result.** An analysis of the functionality of the constructed models was carried out as a means of finding the optimal way to build an information security system. An assessment of information security risks was carried out at the most vulnerable points in the information security processes. An approach to building a multi-level information security system using the functionality of structural-parametric models and Markov chains has been developed and proposed. A pattern has been formulated that makes it possible to determine the correctness of the constructed information security system based on the analysis and assessment of information security risks at the most vulnerable points of a multi-level information security system, in the process of transition from one state to another. **Conclusion.** Ensuring information security using mathematical modeling methods is a relevant and valuable tool based on the dynamism of threats and their uncertainty at different periods of time. The development, testing and implementation of new approaches based on modeling allows us to predict and prevent the most likely actions and steps of an attacker, thereby reducing the level of risk and possible damage to protected information resources and systems.

Keywords: information security, mathematical models, risk assessment, process modeling

For citation: A.M. Konakov, I.I. Livshits. Finding the optimal way to build an information security system based on Markov chains. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2024; 51(3):86-92. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-3-86-92

Введение. Постоянное и непрерывное развитие технологий в современном цифровом мире, неразрывно связано с увеличением угроз в информационном пространстве.

Информация становится все более ценным активом [1], а защита данных и соблюдение мер конфиденциальности становится критически важным аспектом для компаний, частных лиц и общества в целом [2,3].

Постановка задачи. В связи с этим, возрастает потребность в построении и внедрении эффективных систем защиты информации, которые позволяют обеспечить:

1. Качественную оценку рисков и угроз безопасности информации;
2. Прогнозирование и предотвращение (в некоторых случаях – заблаговременное, на ранних этапах) угроз со стороны злоумышленников;
3. Необходимый, в соответствии с требованиями, уровень защиты информации;
4. Минимизацию потерь и оперативное восстановление после нанесённого ущерба.

Методы исследования. Для предотвращения негативных событий и повышения уровня безопасности предлагается использование модели, позволяющей своими функциональными возможностями оптимально спроектировать систему защиты информации, исходя из потребностей, возможностей и динамики процессов защищаемых информационно - технологических ресурсов и систем [4,5].

Предлагаемая модель представляет собой два взаимосвязанных между собой элемента:

Схема построения многоуровневой системы защиты информации в виде структурно - параметрической модели, где на каждом уровне используются различные методы и средства обеспечения информационной безопасности (административные, технические, организационные, нормативно - методические, экономические, а также в случае необходимости, компенсирующие меры) [6]. Построенная схема (рис. 1) является наглядным примером построения комплексной системы защиты информации, но не является обязательной к внедрению и эксплуатации, так как в зависимости от внешних/внутренних факторов и потребностей может видоизменяться (количество уровней эшелонированной защиты, используемые методы и средства обеспечения безопасности).

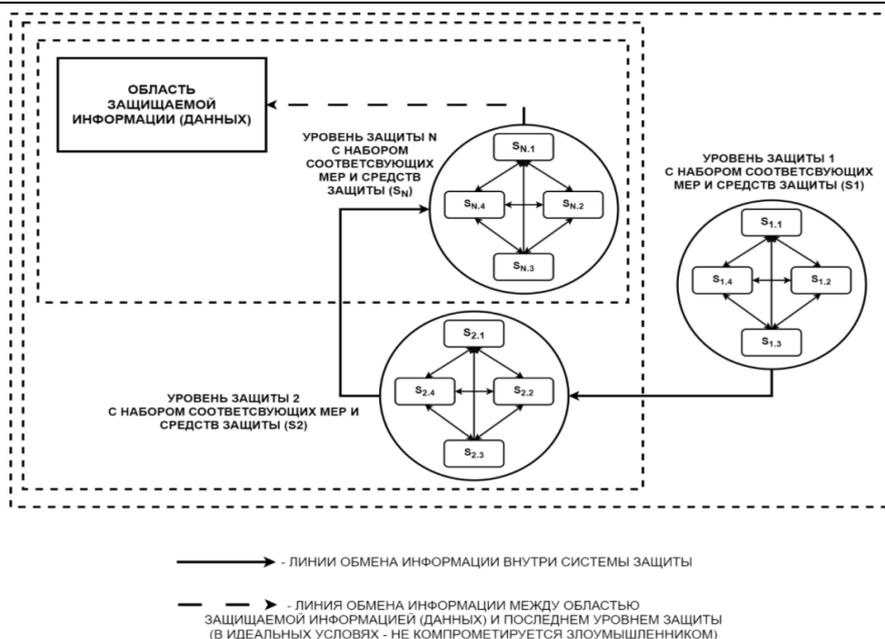


Рис. 1. Схема многоуровневой системы защиты
Fig. 1. Multi-level protection system diagram

Структурно - параметрическая модель при проектировании систем защиты информации представляют собой методологию, которая позволяет определить структуру и параметры системы защиты информации на основе анализа угроз, требований и ее функционала [7]. Такой подход обеспечивает системный подход к проектированию защиты информации, позволяя учитывать все необходимые аспекты безопасности, начиная с физической защиты объектов до применения криптографических методов защиты. Построенная модель позволяет обеспечить прозрачность и контроль состояния протекающих процессов, где на каждом уровне защиты можно корректно оценить риски и принять соответствующие меры. Также, построение общей схемы многоуровневой системы защиты информации в виде структурно – параметрической модели позволяет наглядно оценить возможности внедряемых методов и средств защиты с точки зрения их расположения и более эффективного использования.

Модель Марковской цепи. Граф состояний переходов, показан на рис. 2, где количество цепочек модели высчитывается по следующей формуле:

$$K_{э.ц.с} = N_{ур.заш.} + 2 \quad (1)$$

Где: $K_{э.ц.с}$ – количество элементов цепочки системы графа состояний переходов;

$N_{ур.заш.}$ – количество прогнозируемых уровней системы защиты информации

2 – числовой коэффициент, представляющий собой сумму двух областей – «Внешняя среда» (все, что находится за пределами информационной системы или контролируемой зоны) и Область «физического» и/или «цифрового» расположения защищаемых данных в информационно - технологической инфраструктуре.



Рис. 2. Граф состояний переходов системы защиты информации
Fig. 2. Graph of transition states of the information security system

Обсуждение результатов. Следует отметить, что построение модели Марковской цепи для системы защиты информации требует точной оценки вероятностей переходов между состояниями, что может быть сложной задачей из-за факторов неопределенности

и динамичности угроз [8]. Также важно учитывать, что модель должна быть постоянно обновляться с учетом появления новых угроз и изменений в системе [9].

Модель, основанная на марковской цепи, позволяет осуществить оценку вероятности инцидентов и наиболее вероятные сценарии реализации угроз и атак, при это выполняется оценка поведения злоумышленника, позволяющая заранее предпринять необходимые меры по обеспечению безопасности.

Основная работа модели заключается в образном наложении двух вышеописанных элементов друг на друга, результат которой представляет собой «линию» оптимального и эффективного пути построения системы защиты информации исходя из анализа процессов функционирования защищаемой системы, необходимых методов и средств защиты информации с определенным набором функций (рис. 3).

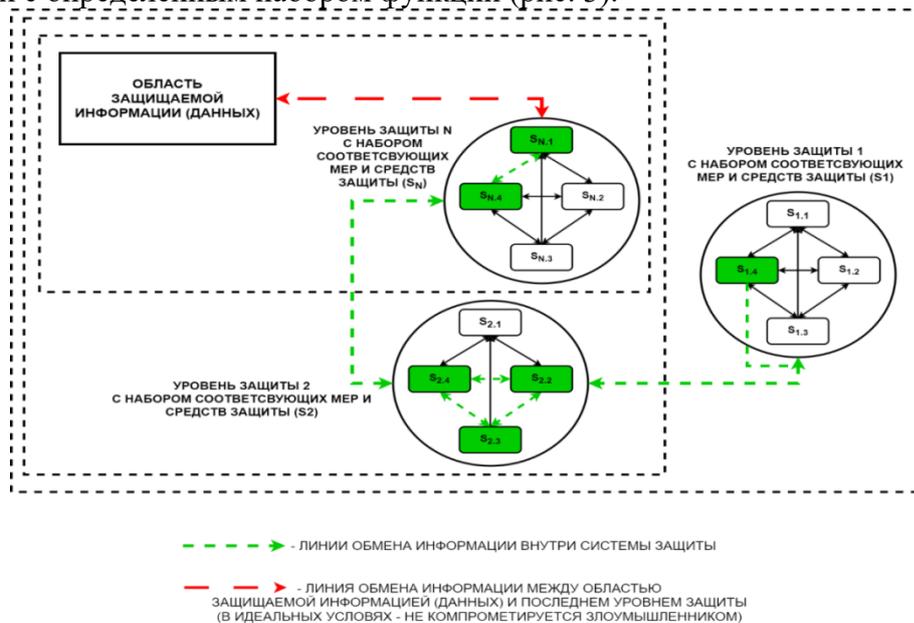


Рис. 3. Линия построения системы защиты информации
Fig. 3. Line of construction of the information security system

Отличительной особенностью предлагаемой модели является гибкая система оценки и возможность адаптации под конкретные потребности информационной системы, которые учитывают специфику вашего бизнеса, (необходимо учитывать условие непрерывности деятельности предприятия /организации, а также требований к менеджменту непрерывности деятельности [10] и обеспечения информационной безопасности [11], указанных в государственных стандартах), законодательные и нормативно - методические требования [12] с акцентом на отечественные и международные стандарты [13], а также другие факторы при разработке и внедрении системы защиты информации.

Дополнительно, на основании построенной модели состояний переходов, можно оценить риски в точках соприкосновения элементов цепи и перехода из одного состояния в другое (так как именно точки состояния перехода между уровнями защиты являются наиболее уязвимыми с точки зрения непрерывности осуществления процессов обеспечения информационной безопасности). Данный уровень риск можно рассчитать по следующей формуле

$$R_{Xp} = P_{Xp} * P_v * S_{Xp} \quad (2)$$

Где: R_{Xp} – уровень риска в точке состояния перехода;

P_{Xp} – вероятность реализации угрозы в точке состояния перехода;

P_v – вероятность наличия уязвимости в точке состояния перехода;

S_{Xp} – функциональная возможность метода/средства защиты покрывающая уязвимость в точке состояния перехода.

В табл. 1 представлены описательные характеристики принимаемых значений переменных формулы расчета уровня риска.

Таблица 1. Характеристика переменных расчета уровня риска
Table 1. Characteristics of variables for calculating the risk level

Вероятность реализации угрозы в точке состояния перехода, P_{Xp} Probability of threat realization at the point of transition state, P_{Xp}	Вероятность наличия уязвимости в точке состояния перехода, P_v Probability of vulnerability at a transition state point, P_v	Функциональная возможность метода/средства защиты, SXp Functionality of the method/means of protection, SXp		Уровень риска в точке состояния перехода, R_{Xp} Risk level at the transition state point, R_{Xp}	
Принимает значения в диапазоне $-[0...1]$ Accepts values in the range $-[0...1]$	Принимает значения в диапазоне $-[0...1]$ Accepts values in the range $-[0...1]$	3	Уязвимости покрываются частично Vulnerabilities are partially covered	$[0...8)$	Уровень риска минимален The risk level is minimal
		2	Покрывается больше половины уязвимостей More than half of the vulnerabilities are covered	$[8...1,75)$	Средний уровень риска Medium risk level
		1	Уязвимости покрываются полностью Vulnerabilities are fully covered	$[1.75...2,5)$	Уровень риска выше среднего The risk level is above average
				$[2...3]$	Максимальный уровень риска Maximum risk level

Стоит также рассмотреть следующие закономерности в представленной модели состояний переходов:

1. Если при движении в сторону области защищаемой информации (данных) в каждой последующей точке состояний переходов между уровнями защиты, уровень риска возрастает ($R_{Xp1} < R_{Xp2} < \dots < R_{XpN}$), то система защиты информации функционирует не корректно и существует возможность несанкционированного доступа и компрометации защищаемой информации, следовательно, необходимо пересмотреть выстроенную линию защиты информации и используемых методов и средств обеспечения безопасности на каждом уровне.
2. Если при движении в сторону области защищаемой информации (данных) в каждой последующей точке состояний переходов между уровнями защиты, уровень риска снижается ($R_{Xp1} > R_{Xp2} > \dots > R_{XpN}$), то система защиты информации корректно функционирует, и рекомендовано осуществление мониторинга состояния угроз с периодической переоценкой риска.
3. Если при движении в сторону области защищаемой информации (данных) в каждой последующей точке состояний переходов между уровнями защиты, уровень риска остается неизменным ($R_{Xp1} = R_{Xp2} = \dots = R_{XpN}$), то система защиты информации подлежит пересмотру и/или внедрению дополнительных средств защиты с реализацией возможных компенсирующих мер.

Вывод. В статье предложена модель, с помощью которой можно осуществить построение оптимальной линии проектирования системы защиты информации информационно - технологической инфраструктуры, позволяющая отвечать современным угрозам, снижать «нагрузку» на функционирующую систему, а также обеспечивать эффективность защиты ценной информации и ресурсов в корреляции с основными положениями экономической целесообразности выделенных затрат в рамках функционирования организации [14,15].

Функциональные возможности и фундаментальные свойства Марковских цепей и структурно – параметрических моделей позволяют наглядно продемонстрировать и численно вычислить оптимальную стратегию построения системы защиты информации (оптимально подобранные методы и средства информации в зависимости от уровня защиты)

как эффективного инструмента противодействия различным видам угроз информационной среды с учётом необходимых потребностей и требований к системам защиты.

Построение системы защиты информации на основе Марковских цепей и структурно - параметрических моделей может быть сложной задачей, требующей тщательного анализа и проектирования. Оптимальный путь в данном случае будет зависеть от конкретных требований и условий системы.

Библиографический список:

1. Домбровская Л. А., Яковлева Н. А., Стахно Р. Е. Современные подходы к защите информации, методы, средства и инструменты защиты // Наука, техника и образование. – 2016. – №. 4 (22). – С. 16-19.
2. Пономарев К. Г., Кошелев С. О. Построение системы защиты информации для государственной информационной системы // Современные технологии: актуальные вопросы, достижения и инновации. – 2020. – С. 35-38.
3. Прокушев Я. Е., Пономаренко С. В., Шишов Н. В. Моделирование процессов проектирования систем защиты информации в критических информационных инфраструктурах // Computational nanotechnology. – 2022. – Т. 9. – №. 2. – С. 45-55.
4. Моделирование процессов и систем защиты информации [Текст] : учебное пособие / Е. В. Стельмашонок, В. Л. Стельмашонок ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский государственный экономический университет", Кафедра вычислительных систем и программирования. - Санкт-Петербург : Изд-во Санкт-Петербургского гос. экономического ун-та, 2017. - 75 с.
5. Овчинников А. И. и др. Математическая модель оптимального выбора средств защиты от угроз безопасности вычислительной сети предприятия // Вестник Московского государственного технического университета им. НЭ Баумана. Серия «Приборостроение». – 2007. – №. 3. – С. 115-121.
6. Липатников В. А., Парфилов В. А. Структурно-параметрический метод защиты информационно-телекоммуникационной сети специального назначения в условиях информационного конфликта // Системы управления, связи и безопасности. – 2023. – №. 4. – С. 105-156.
7. Меньших В. В., Чиркова Н. Е. Построение структурно-параметрической модели гетерогенной системы обеспечения безопасности с использованием теории метаграфов // Вестник Воронежского института МВД России. – 2021. – №. 1. – С. 54-61.
8. Касенов А. А. и др. Марковская модель оптимизации средств защиты информации // Динамика систем, механизмов и машин. – 2019. – Т. 7. – №. 4. – С. 77-84.
9. Щеглов К. А., Щеглов А. Ю. Марковские модели угрозы безопасности информационной системы // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2015. – Т. 58. – №. 12. – С. 957-965.
10. ГОСТ Р ИСО 22301-2021 Надежность в технике. Системы менеджмента непрерывности деятельности. Требования.
11. ГОСТ Р ИСО/МЭК 27001-2021 Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Системы менеджмента информационной безопасности. Требования;
12. Соловьев С. В. и др. Состояние и перспективы развития методического обеспечения технической защиты информации в информационных системах // Вопросы кибербезопасности. – 2023. – №. 1. – С. 41-57.
13. Макарова Д. Г., Старикова А. А., Таратынова У. В. Построение системы защиты информации государственной информационной системы с применением международных стандартов // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2017. – Т. 8. – С. 226-230.
14. Кожарский Ю. А., Масеев Д. Д. Особенности построения системы обеспечения информационной безопасности на предприятии // National Science. – 2023. – Т. 1. – №. 6. – С. 25-32.
15. Моделирование процессов и систем защиты информации. AnyLogic [Текст]: учебное пособие / А. В. Шабурова, В. А. Селифанов, В. В. Селифанов, П. А. Звягинцева, Ю. А. Исаева, А. С. Голдобина, А. В. Селифанов. – Новосибирск : СГУГиТ, 2020 – 70 с.

References:

1. Dombrovskaya L. A., Yakovleva N. A., Stakhno R. E. Modern approaches to information protection, methods, means and tools of protection. *Science, technology and education*. 2016; 4 (22):16-19. (In Russ)
2. Ponomarev K. G., Koshelev S. O. Construction of an information security system for the state information system. *Modern technologies: current issues, achievements and innovations*. 2020;35-38. (In Russ)
3. Prokushev Ya. E., Ponomarenko S. V., Shishov N. V. Modeling processes for designing information security systems in critical information infrastructures. *Computational nanotechnology*. 2022;9(2): 45-55. (In Russ)
4. Modeling processes and information security systems [Text]: textbook / E. V. Stelmashonok, V. L. Stelmashonok; Ministry of Education and Science of the Russian Federation, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "St. Petersburg State Economic University", Department of Computer Systems and Programming. - St. Petersburg: Publishing house of the St. Petersburg State. Economic University, 2017; 75. (In Russ)

5. Ovchinnikov A.I. et al. Mathematical model of the optimal choice of means of protection against threats to the security of an enterprise computer network. *Bulletin of the Moscow State Technical University. NE Bauman. Series "Instrument making"*. 2007;3:115-121. (In Russ)
6. Lipatnikov V. A., Parfirov V. A. Structural-parametric method of protecting a special-purpose information and telecommunication network in conditions of information conflict. *Control, communication and security systems*. 2023;4:105-156. (In Russ)
7. Menshikh V.V., Chirkova N.E. Construction of a structural-parametric model of a heterogeneous security system using metagraph theory. *Bulletin of the Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia*. 2021; 1: 54-61. (In Russ)
8. Kasenov A. A. et al. Markov model for optimizing information security tools. *Dynamics of systems, mechanisms and machines*. 2019;7(4): 77-84. (In Russ)
9. Shcheglov K. A., Shcheglov A. Yu. Markov models of threats to the security of an information system. *News of higher educational institutions. Instrumentation*. 2015; 58(12): 957-965. (In Russ)
10. GOST R ISO 22301-2021 Reliability in technology. Business continuity management systems. Requirements. (In Russ)
11. GOST R ISO/IEC 27001-2021 Information technology. Methods and means of ensuring security. Information security management systems. Requirements; (In Russ)
12. Solovyov S.V. et al. State and prospects for the development of methodological support for technical information protection in information systems. *Issues of cybersecurity*. 2023; 1: 41-57. (In Russ)
13. Makarova D. G., Starikova A. A., Taratynova U. V. Construction of an information protection system for the state information system using international standards. *Interexpo Geo-Siberia*. 2017; 8: 226-230. (In Russ)
14. Kozharsky Yu. A., Maseev D. D. Features of constructing a system for ensuring information security at an enterprise. *National Science*. 2023;1(6): 25-32. (In Russ)
15. Modeling of information security processes and systems. AnyLogic [Text]: tutorial / A. V. Shaburova, V. A. Selifanov, V. V. Selifanov, P. A. Zvyagintseva, Yu. A. Isaeva, A. S. Goldobina, A. V. Selifanov. – Novosibirsk: SGUGiT, 2020;70. (In Russ)

Сведения об авторах:

Конаков Александр Михайлович, магистрант, helium1937@yandex.ru.

Лившиц Илья Иосифович, доктор технических наук, профессор практики, Livshitz.i@yandex.ru

Information about authors:

Alexander M. Konakov, Master's student, helium1937@yandex.ru

Ilya I. Livshits, Dr. Sci.(Eng.), Prof. of Practice; Livshitz.i@yandex.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/ Received 21.03.2024.

Одобрена после рецензирования/ Revised 22.04.2024.

Принята в печать/ Accepted for publication 22.04.2024.

**Структурная организация нечёткой системы контроля состояния
оборудования и управления газораспределительной станцией**

А.И. Магомедов¹, И.А. Магомедов¹, М.Ш. Усманов²

¹Дагестанский государственный технический университет,

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

²ООО «Газпром трансгаз Грозный»,

²366011, Чеченская Республика, с. Знаменское, ул. А.Кадырова, д.21, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является создание интеллектуальной системы контроля состояния оборудования и управления режимами работы газораспределительной станции (ГРС) основой которой является логико-лингвистическая (нечёткая) модель принятия оценочных и управленческих решений. **Метод.** При описании системы контроля и управления ГРС использована теория нечётких множеств и алгоритмов Л.Заде, которая в отличие от классической теории управления, допускает использование качественных понятий и позволяет создавать на их основе логико-лингвистические модели управляемого процесса. **Результат.** Приведено обоснование применения интеллектуальной системы оценки состояний оборудования и управления газораспределительной станцией на основе логико-лингвистической (нечёткой) модели представления базы знаний принятия оценочных и управленческих решений. Данный подход даёт разработчикам систем управления сложными процессами и/или объектами понятный и эффективный способ описания их динамики. **Вывод.** Интеллектуальная система оценки состояний оборудования и управления режимами работы ГРС, в которой база знаний представлена в виде логико-лингвистической (нечёткой) модели, позволяет обеспечивать решения указанной задачи основываясь на знаниях опытного эксперта (диспетчера), что способствует повышению качества обслуживания и снижению эксплуатационных расходов ГРС.

Ключевые слова: газораспределительная станция, ГРС, состояния объекта, логико-лингвистическая модель, нечёткие алгоритмы, теория нечётких множеств, динамика управляемого объекта, неопределённая среда

Для цитирования: А.И. Магомедов, И.А. Магомедов, М.Ш. Усманов. Структурная организация нечёткой системы контроля состояния оборудования и управления газораспределительной станцией. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2024; 51(3):93-102. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-3-93-102

Structural organization of a fuzzy system for monitoring the condition of equipment and control of a gas distribution station

A.I. Magomedov¹, I.A. Magomedov¹, M.Sh. Usmanov¹

¹Daghestan State Technical University,

367026, Makhachkala, I. Shamil Ave., 70, Russia,

²Gazprom Transgaz Grozny,

²21 A.Kadyrov St., Chechen Republic, Znamenskoye village 366011, Russia

Abstract. Objective. The objective of the study is to create an intelligent system for monitoring the condition of equipment and managing the operating modes of a gas distribution station (GDS) based on a logical-linguistic (fuzzy) model for making assessment and management decisions. **Method.** The theory of fuzzy sets and algorithms of L. Zade was used, which allows the use of qualitative concepts and allows the creation of logical-linguistic models of the controlled process on their basis. **Result.** The article provides a rationale for using an intelligent

system for assessing the state of equipment and managing a gas distribution station (GDS) based on a logical-linguistic (fuzzy) model for representing the knowledge base for making assessment and management decisions. This approach provides developers of control systems for complex processes and/or objects with a clear and effective way to describe their dynamics. **Conclusion.** An intelligent system for assessing equipment conditions and managing the operating modes of the gas distribution station, in which the knowledge base is presented in the form of a logical-linguistic (fuzzy) model, allows for solutions to the specified problem based on the knowledge of an experienced expert (dispatcher), which will improve the quality of service and reduce the operating costs of the gas distribution station

Keywords: gas distribution station, GDS, object states, logical-linguistic model, fuzzy algorithms, theory of fuzzy sets, dynamics of a controlled object, uncertain environment

For citation: A.I. Magomedov, I.A. Magomedov, M.S. Usmanov. The structural organization of a fuzzy system for monitoring the condition of equipment and control of a gas distribution station. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2024; 51(3):93-102. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-3-93-102

Введение. Управление таким сложным разноплановым объектом как газораспределительная станция (ГРС) с использованием классической методологии сталкивается с проблемами отсутствия адекватной математической модели, так как для точного математического описания динамических свойств режимов работы ГРС необходимо учитывать влияние большого количества разных контролируемых и неуправляемых факторов, начиная с самого объекта, заканчивая проблемной средой функционирования.

Решение задач управления сложными объектами или технологическими процессами многие исследователи [1-7] видят в применении чрезвычайно мощного инструмента теории нечётких множеств и алгоритмов (нечёткая логика), предложенной Л. Заде в 1965 г. в работе [1] и в использовании последних достижений в области информационных технологий и аппаратных средств построения АСУ. Эта теория, в отличие от традиционных количественных методов системного анализа, допускает использование качественных понятий, таких как *лингвистические переменные* (ЛП) и создавать на их основе логико-лингвистические модели управляемого процесса [2]. Модели, построенные на основе ЛП, легко читаются человеком, так как записываются на естественном языке.

Например, для нечёткой системы регулирования давления на ГРС, могут быть использованы правила вида: «Если *давление очень высокое* и *скорость изменения давления отрицательно низкая*, то *управление отрицательно среднее*», где «*давление*», «*скорость изменения давления*» и «*управление*» - входные и выходная лингвистические переменные для нечетких систем управления, а «*очень высокое*», «*отрицательно низкая*» и «*отрицательно среднее*» - значения этих переменных. Количество ЛП и пределы изменения их границ определяются в зависимости от решаемой задачи опытными экспертами в данной предметной области.

Таким образом, опираясь на теорию лингвистических переменных и нечётких алгоритмов [1,2], обычная задача управления оказывается погруженной в нечёткую среду, позволяющую формализовать и преобразовать выраженный в нечёткой словесной форме опыт экспертов в логико-лингвистические модели принятия управленческих решений. Данный подход даёт приближенные, но, в то же время, эффективные способы описания поведения систем, настолько сложных и/или плохо определённых, что они практически не поддаются точному математическому анализу.

Постановка задачи. Проведённый в работе анализ источников информации [8-13] показал, что в настоящее время отсутствуют интеллектуальные системы оценки качества состояния оборудования и управления режимами работы ГРС, которые могли бы автоматизировать в полном объёме все процессы, происходящие в ГРС при качественном и безопасном ее функционировании. Работы по созданию и совершенствованию систем контроля и управления режимами работы ГРС продолжаются и в настоящее время.

Например, в работе [8] рассматривается комплекс автоматического управления ГРС на базе ПТК «Каскад-САУ», состоящий из SCADA-пакета и аппаратных средств организации технической части комплекса. Такие системы были установлены на объектах ООО «Волготрансгаз» и ОАО «Верхневолжскнефтепровод» и функционируют до сегодняшнего дня. В статье [9] рассмотрены локальные системы автоматизации ГРС, которые имеют единый диспетчерский центр контроля и управления. В работе приведены основные технические характеристики и функциональные возможности системы, описаны аппаратные и программные средства построения системы. В [10] приведена система автоматического управления газораспределительной станцией ВЕГА-ГАЗ. Она предназначена для контроля ТП ГРС подачи газа потребителем в соответствии с договорными обязательствами.

Система автоматизированного управления ГРС приведена в работе [11]. Система предназначена для непрерывного управления оборудованием и контроля технологического процесса ГРС подачи потребителям товарного газа в заданном объёме с определённым давлением, необходимой степенью очистки и одоризации и представляет собой аппаратно-программный комплекс с возможностью дистанционного управления запорной арматурой и другими технологическими объектами по команде с панели оператор, а также сбор, обработка и отображения технологической информации о режимах работы ГРС, состоянии основного и вспомогательного оборудования и положении запорной арматуры.

В последние годы получила широкое распространение концепция SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) [12,13], которая предопределена новыми методами и средствами построения систем управления, а также достижениями и результатами научно-технического прогресса. Применение SCADA-технологий позволяет достичь высокого уровня автоматизации в решении задач разработки систем управления, сбора, обработки, передачи, хранения и отображения информации. SCADA являясь на сегодня наиболее широко используемой системой проектирования АСУ сложными ТП, но и она не учитывает последние достижения в области информационных и беспроводных технологий, которые могут быть использованы для построения АС меньшими затратами и с расширенными функциональными возможностями.

Все рассмотренные выше системы были разработаны по устаревшим технологиям проектирования, так как разрабатывались более 15-20 лет тому назад, хотя и сегодня они являются актуальными для решения определённого класса задач управления ГРС. Кроме того, в существующих системах не учитываются вопросы оценки состояния оборудования ГРС и не формируются прогнозные оценки их надёжности, что может привести к авариям на ГРС с тяжёлыми последствиями.

Современные информационные технологии и возросший уровень предлагаемых потребителю средств автоматизации позволяют создавать качественно новое оборудование, существенно превосходящее по всем параметрам ныне действующее.

В связи с этим, в настоящей научной работе разрабатываются:

- основные принципы построения интеллектуальной системы контроля состояния оборудования и управления режимами работы газораспределительной станции (ГРС) основанной на логико-лингвистической (нечёткой) модели принятия оценочных и управленческих решений;
- вопросы структурной организации интеллектуальной системы контроля состояния оборудования и управления ГРС на базе локальных систем управления (ЛСУ) с использованием ячеистых сетей ЛСУ на основе беспроводной технологии для обмена учётной и технологической информацией;
- структуры ЛСУ и контроля состояния оборудования ГРС, построенные по модульному принципу проектирования и открытой архитектурой, что позволит адаптировать и их к различным технологическим схемам ГРС и существенно сократить время проектирования и средства на их создание;

- логико-лингвистические модели (ЛЛМ) оценки состояния оборудования и управления режимами работы ГРС, что позволит одновременно решить и задачу оценки состояния оборудования, и задачу управления, а также использовать и сохранить знания и большой практический опыт работы оператора ГРС в виде ЛЛМ;
- ячеистые сети организации обмена данными между ЛСУ по радиоканалу и координатором сети. Использование ячеистой сети локальных систем управления обеспечит высокую надёжность канала связи между участниками сети, так как имеется возможность выбора альтернативного маршрута беспроводной передачи технологической и учётной информации в дом оператора, где должен быть установлен компьютер с соответствующим программным обеспечением координатора ячеистой сети.

Методы исследования. Анализ современных технологических схем ГРС и существующих СУ ГРС показывает, что СУ режимами работы ГРС должна быть построена по следующим принципам:

1. С применением элементов искусственного интеллекта, что позволит использовать большой накопленный опыт работы по управлению оператором ГРС и решить все задачи сбора, обработки, хранения, отображения технологической информации, контроля и регулирования параметров, а также управления технологическими установками ГРС;
2. По модульному принципу, что даёт возможность адаптировать систему управления к различным технологическим схемам ГРС и существенно сократит время разработки и внедрения системы;
3. С использованием локальных микроконтроллерных систем управления технологическими установками ГРС, что повысит живучесть и надёжность системы, а также снизить эксплуатационные расходы на обслуживание ГРС в целом;
4. На базе беспроводной технологии с использованием ячеистой сети локальных систем управления, что обеспечит высокую надёжность канала связи между участниками сети и возможность выбора альтернативного маршрута беспроводной передачи технологической и учётной информации в дом оператора, где должен быть установлен компьютер с соответствующим программным обеспечением координатора ячеистой сети.
5. На базе пожаро- и искрозащищённых модулей, разработанных с соблюдением соответствующих нормативных актов отрасли, стандартов и технических условий;
6. С учётом того, что все ГРС строятся на открытых площадках в целях безопасности, т.е. модули должны быть защищены от внешних воздействий на их работу;
7. ЛСУ должны иметь программное обеспечение самоорганизации и самонастройки с целью формирования канала обмена данными с координатором ячеистой сети и обхода, не работающего узла сети, что позволит повысить живучесть системы в целом за счет динамической и/или статической реконфигурации каналов связи;
8. ЛСУ должны иметь встроенные аппаратно-программные средства защиты учётной и технологической информации от несанкционированного доступа (НСД), а также программные средства оповещения координатора сети о наличии признака НСД в сетях. Наличие указанных средств позволит исключить человеческий фактор из процесса сбора, обработки и хранения данных в системе;
9. Ячеистые сети ЛСУ должны быть построены по открытой архитектуре с целью масштабирования как в сторону увеличения участников сети, так и в сторону их уменьшения, что расширит функциональные возможности системы и адаптировать СУ к различным технологическим схемам ГРС.

Современная АСУ ТП представляет собой многоуровневую человеко-машинную систему управления. Без соответствующего анализа объекта управления и/или технологического процесса управления, создание автоматизированной системы управления такими сложными объектами, как газораспределительная станция (ГРС), даже с учётом последних достижений в области информационных технологий и аппаратных средств построения

АСУ, практически невозможно. Постоянно совершенствующиеся технологические схемы самых ГРС, как объектов управления, требуют создания аппаратно-программных средств с элементами систем искусственного интеллекта, свойствами адаптации системы к изменяющимся структурам ГРС и требованиям безопасного управления режимами работы ГРС. Поэтому, в работе предлагается структура СУ режимами работы ГРС в виде полносвязанного графа, где на вершинах расположены ЛСУ, а дуги представляют собой связи между вершинами по радиоканалу (рис. 1). Отметим, что вершина помеченная КС (координатор сети) является координатором ячеистой сети, построенная на ЛСУ. Штрих-пунктирной линией отмечены некоторые возможные варианты связи координатора сети (КС) с вершиной ЛСУ1.

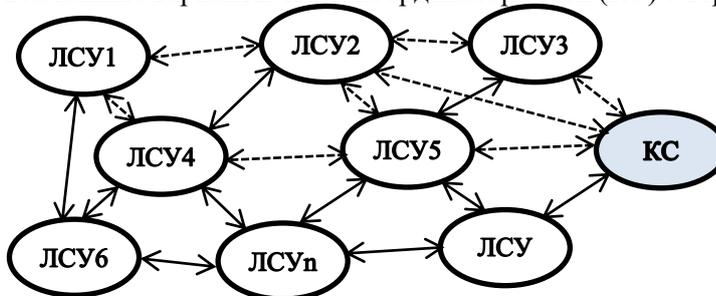


Рис. 1. Графовая структура системы управления ГРС
 Fig. 1. Graph structure of the GDS control system

Локальные системы управления режимами работы ГРС целесообразно строить в виде модулей на базе микроконтроллера со встроенным модемом (рис. 2), т.е. по модульному принципу.

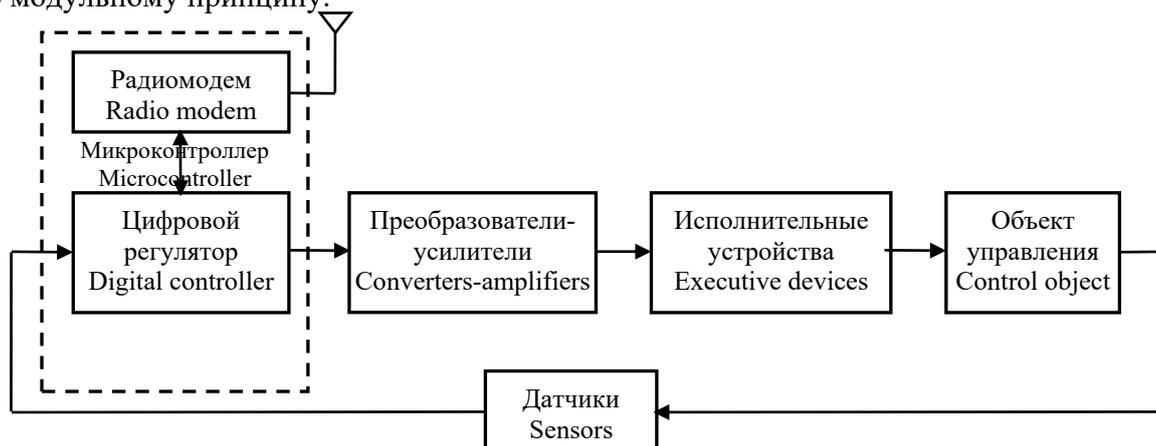


Рис. 2. Обобщенная структурная схема локальной системы управления (ЛСУ)
 Fig. 2. Generalized structural diagram of the local control system (LCS)

ЛСУ может иметь в своём составе, в зависимости от технологической схемы ГРС, следующие модули: измерительный модуль сбора учётной информации и значений, контролируемых и регулируемых технологических параметров; усилительно-преобразовательный модуль; модуль управления исполнительным устройством; модуль источника питания; модуль обработки данных и управления; модуль радиоканала. Кроме того, исходя из решаемых задач, модули могут быть использованы и для построения ЛСУ, и для систем контроля состояния оборудования, и для системы учёта расхода газа. Отметим, что во всех указанных вариантах основным модулем является микроконтроллерный модуль со встроенным модемом, где в зависимости от области его применения меняется программное обеспечение, алгоритмы принятия управленческих решений и оценки качества состояния оборудования ГРС. Такой подход позволит адаптировать систему к различным технологическим схемам ГРС, сократить время проектирования и внедрения, существенно снизить расходы на проектирование и эксплуатацию, а также повысить живучесть системы за счёт способности ячеистой сети на самоорганизацию и настройки.

Большой интерес у специалистов по управлению к нечётким (логико-лингвистическим) моделям объясняется, в основном, следующими факторами: простота реализации; функциональная устойчивость как к внешним возмущениям, так и к изме-

нениям параметров управляемого процесса в достаточно широких (до $\pm 30\%$) пределах изменения; возможность использования богатого практического опыта специалистов, не имеющих специальных знаний, выраженного ими в качественной форме. Подход, приведённый в работе, представляет собой отход от традиционных классических методов системного синтеза и анализа. И вот почему: для построения систем оценки состояния оборудования и управления режимами работы ГРС не требуется математическая модель управляемого процесса, а используется, вместо или в дополнения количественным данным, понятие «лингвистическая» переменная; отношения между лингвистическими переменными описываются посредством нечётких выражений типа Если А, то В»; характеристика сложных отношений с помощью нечётких алгоритмов.

Укажем на некоторые из причин, обусловивших необходимость перехода от классических моделей теории управления к логико-лингвистическим моделям на примере узла подогрева ГРС, предназначенного для подогрева газа в соответствии с технологией подготовки до определённой температуры, достаточной для поддержания температуры газа на выходе ГРС и исключения гидратообразования при редуцировании газа, а также для систем отопления помещений или других возможных теплопотребителей.

Структура нечёткой локальной системы управления приведена на рис. 3, в которой нечёткие алгоритмы принятия управленческих решений регулирования температуры в узле подогрева реализованы программно на микроконтроллере, что допустимо для медленных процессов управления.

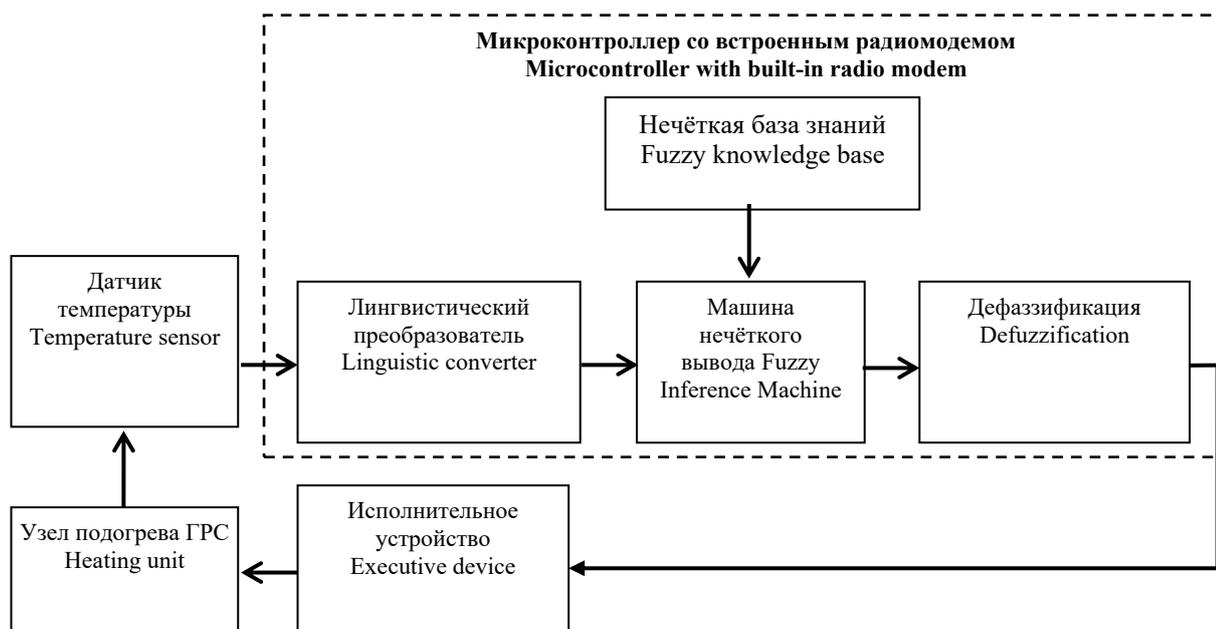


Рис. 3. Структурная схема модуля нечёткой локальной системы управления регулирования температуры в узле подогрева ГРС

Примечание: Дефаззификация- процесс получения числового значения выходной переменной; используется метод центра тяжести [3,4]

Fig. 3. Structural diagram of the module of the fuzzy local control system for regulating the temperature in the heating unit of the gas distribution station

Note: Defuzzification is the process of obtaining the numerical value of the output variable; the center of gravity method is used [3,4]

Сложность узла подогрева (узла предотвращения гидратообразования) ГРС, как объекта управления заключается в следующем:

1. Между рядом параметров, оказывающих влияние на процесс регулирования температуры, не удаётся установить точных количественных зависимостей.
2. Процесс регулирования является многошаговым, и содержание каждого шага не может быть заранее однозначно определено.

3. Существующие способы описания объектов и протекающих в них процессов, традиционными методами теории управления приводят к столь громоздким конструкциям, что их практическое использование встречает значительные вычислительные трудности, либо малоэффективными, либо просто непригодными.
4. Объект эволюционирует во времени, меняется его структура и функции, что приводит к эволюции самого процесса управления.
5. Не все цели оценки качества и управления объектом могут быть выражены в виде количественных соотношений.

Дополнительным обоснованием использования принципов нечёткого управления для решения задач оценки состояния оборудования и управления режимами работы ГРС можно считать возможность:

- создания нечётких локальных систем управления на базе предлагаемых потребителю дешёвых микроконтроллерных средств автоматизации, которые позволяют проектировать качественно новое оборудование, существенно превосходящее по всем параметрам ныне действующее;
- возможность создания нечётких адаптивных систем регулирования технологических параметров ГРС при постоянно изменяющихся условиях потребления газа и наличии неконтролируемых внешних воздействий;
- невысокие расходы на адаптацию и внедрение нечёткой системы управления для решения при проектировании и создании нового технологического оборудования.

Решение задачи построения системы автоматического управления режимами работы ГРС может быть найдено в области систем искусственного, где ядром системы является база знаний, представленной в виде нечёткой (логико-лингвистической) модели принятия управленческих решений.

В основу такой модели положены знания и опыт работы диспетчера ГРС, выраженный им в словесной форме как правила принятия решений вида [5, 14]:

П₁: если x есть A_1 и y есть B_1 , то z есть C_1 ,

П₂: если x есть A_2 и y есть B_2 , то z есть C_2 ,

...

П_n: если x есть A_n и y есть B_n , то z есть C_n .

где x – отклонение от заданного регулируемого значения, $x \in X$;

y – скорость изменения отклонения, $y \in Y$;

z – выходная переменная, $z \in Z$.

A_i , B_i и C_i – нечёткие множества, определённые на X , Y и Z с помощью функций принадлежности $\mu_{A_i}(x)$, $\mu_{B_i}(y)$ и $\mu_{C_i}(z)$ при заданных пределах изменения.

Для построения указанных функций в MATLAB для нашего примера задавались следующие области изменения переменных: - ∓ 15 град.; Скорость изменения отклонения - ∓ 2 град/мин. и Угол поворота задвижки - ∓ 90 град. соответственно (рис. 4-6).

Качественное описание самого процесса регулирования температуры в узле подогрева определено, как набор нечётких правил принятия управленческих решений вида: Если Отклонение **положительно среднее** (ПС) и Скорость изменения отклонения **отрицательно средняя** (ОС), то Угол поворота задвижки **Положительно маленький** (ПМ), иначе.....

В табл.1 приведены нечёткие правила принятия управленческих решений (всего 25 правил), высказанные на естественном языке опытным диспетчером ГРС с использованием приведённых выше значений лингвистических переменных.

Набор таких правил можно назвать нечёткой базой знаний и определяет взаимосвязи между входными /выходными переменными объекта управления и в ЛСУ будут реализованы программно на микроконтроллере (рис. 3).

Таблица 1. Нечёткие правила регулирования температуры в узле подогрева
Table 1. Fuzzy rules for temperature control in the heating unit

Скорость изменения отклонения Rate of change of deviation	Отклонение от заданной температуры Deviation from the set temperature				
	ОС отрицательно среднее negative average	ОМ отрицательно малое negative small	Н нулевое zero	ПМ положительно малое positively small	ПС положительно среднее positive average
ОС	ПС	ПС	ПМ	Н	Н
ОМ	ПС	ПМ	ПМ	Н	ПМ
Н	ПМ	Н	Н	Н	ОМ
ПМ	ПМ	Н	Н	Н	Н
ПС	ОМ	ОМ	ОС	ОС	ОС

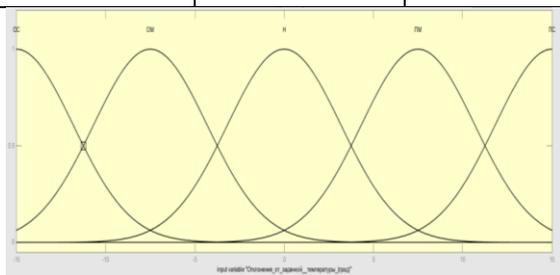


Рис. 4. График функции принадлежности лингвистической переменной «Отклонение»
Fig. 4. Graph of the membership function of the linguistic variable "Deviation"

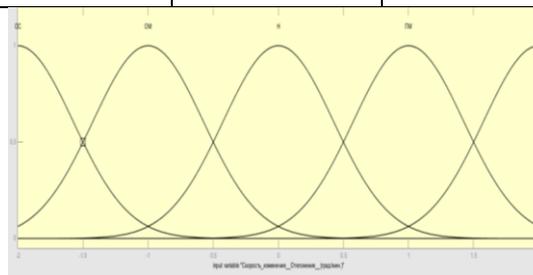


Рис. 5. График функции принадлежности лингвистической переменной «Скорость изменения отклонения»
Fig. 5. Graph of the membership function of the linguistic variable "Rate of change of deviation"

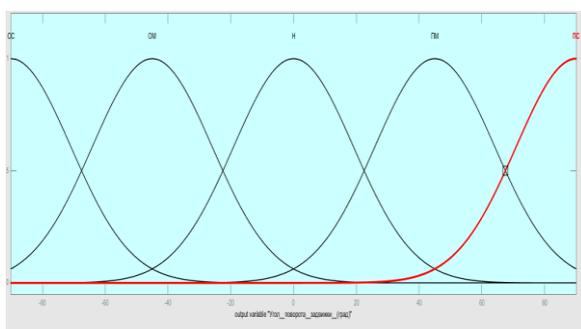


Рис. 6. График функции принадлежности лингвистической переменной «Угол поворота задвижки»
Fig. 6. Graph of the membership function of the linguistic variable "Rotation angle of the valve"

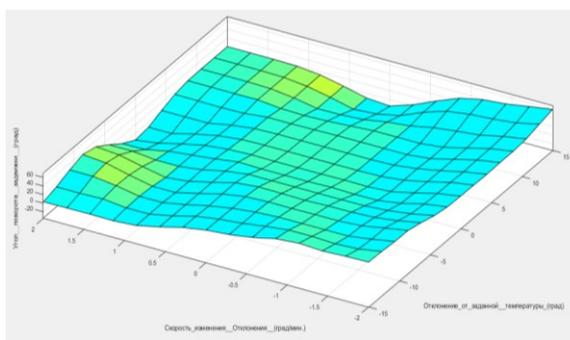


Рис. 7. Трёхмерный график зависимости выходного значения нечёткой системы от входных воздействий
Fig. 7. Three-dimensional graph of the dependence of the output from the input effects

Приведённый на рис. 7 трёхмерный график говорит о том, что нечёткие алгоритмы принятия управленческих решений (табл.1) регулирования температуры в узле подогрева ГРС позволяют сделать вывод о хорошем качестве описания нечёткими правилами моделируемой нелинейной системы.

Отметим, что качество описания можно существенно улучшить при добавлении значений (терм-множеств) лингвистических переменных как для входных, так и для выходных переменных, например, термами «отрицательно большое», «положительно большое» и т.д.

Преимущество использования нечётких правил в том, что можно описывать алгоритмы управления на близком к естественному языку, что упрощает восприятие правил человеком, их разработку и изменение. Недостаток такого подхода - при каждом принятии решения необходимо рассчитывать степень истинности каждого из правил, что может оказаться нетривиальной задачей при большом количестве правил.

Дело в том, что с увеличением количества правил, необходимо увеличить и вычислительные мощности системы, так как большинство систем управления на основе нечётких множеств работают в реальном времени. Особенно это касается при управлении быстрыми процессами. В таких случаях нужно либо пересмотреть базу правил и уменьшить количество правил, либо пользоваться различными методами оптимизации.

Применение специализированного сопроцессора [14], реализующего алгоритм нечёткого управления совместно с микроконтроллером, позволит адаптировать систему к изменяющим нагрузкам и организовать процедуру обучения выбора оптимальных параметров функций принадлежности, используя при этом, в качестве предварительной информации, только исходные правила и значения параметров, полученных, например, с помощью несложных расчётов.

Вывод. Исследование в работе построено на анализе современных систем контроля состояния оборудования и управления режимами работы газораспределительной станции, а также на базе функциональных и коммуникационных возможностей, предлагаемых потребителю недорогих микроконтроллеров со встроенными средствами организации беспроводной связи, которые позволяют создавать качественно новые структуры нечётких систем управления сложными технологическими процессами с элементами искусственного интеллекта, существенно превосходящие по всем параметрам ныне существующие.

В работе сформированы основные принципы построения интеллектуальных систем контроля состояния оборудования и управления режимами работы газораспределительной станции. На основе разработанных принципов предложен модульный вариант организации системы, в качестве модулей используются нечёткие локальные системы управления (ЛСУ), а связь между ними и оператором ГРС организована посредством ячеистой сети ЛСУ, построенных на МК со встроенными радиоканалом.

Показано, что ячеистые сети могут быть построены не только на приборах учёта, но и на базе цифровых локальных систем управления различными узлами ГРС реализованных на микроконтроллере.

Библиографический список:

1. Zadeh L.A. Fuzzy sets. Inform. Control, 1963, v. 8, p. 338-353.
2. Заде Л.А. Понятие лингвистического переменного и его применение к принятию приближенных решений. - М.: Мир, 1976. - 168 с.
3. Mamdani E.H., Assilian S. A fuzzy logic controller for a dynamic plant. Int. J. Man-Machine Stud., 1975, v. 7, p. 1-13.
4. <https://neuronus.com/theory/fl/308-nechetkie-vyvody.html>
5. Асаи К., Ватада Д., Иваи С. и др. Прикладные нечёткие системы : пер. с яп. – М. : Мир, 1993.
6. Магомедов, И. А. Математическая и аппаратная поддержка логико-лингвистических моделей управления сложными динамическими объектами / И. А. Магомедов, Г. Х. Ирзаев. – Махачкала : Типография ФОРМАТ, 2022. – 159 с. – ISBN 978-5-907484-61-0. – EDN SCTFFI.
7. Асаи К., Ватада Д., Иваи С. и др. Прикладные нечёткие системы : пер. с яп. – М. : Мир, 1993.
8. Р. Мочалов, А. Худов, А. Язев. Автоматизация сети газораспределительных станций на базе программно-технического комплекса «КаскадСАУ». СТА 2/2008-С. 36-45
9. <https://www.cta.ru/articles/cta/otrasli/neftegazovaya-promyshlennost/125021/>
10. <https://vega-gaz.ru/Products/saugrsriusgrs>
11. https://newgaztech.ru/upload/files/catalog_file/7b24e7e1589942d24b94aa33cf8f029b.pdf
12. <https://makhachkala.lcbit.ru/blog/chto-takoe-scada-sistema/>
13. Максимова, Е. А. Использование SCADA-технологий в современных автоматизированных системах управления / Е. А. Максимова, С. Н. Грицок. -Текст : непосредственный // Молодой ученый. — 2015. — № 22.5 (102.5). — С. 45-48. - URL: <https://moluch.ru/archive/102/23624/> (дата обращения: 03.04.2024).
14. Магомедов А.И. Интеллектуальная система управления траекторным движением морского подвижного объекта и классификации объектов. Морские интеллектуальные технологии 2024., № 2 часть 1. С. 208-218.

References:

1. Zadeh L.A. Fuzzy sets. Inform. Control, 1963; 8: 338-353.
2. Zadeh L.A. The concept of a linguistic variable and its application to making approximate decisions. - М.: Mir, 1976;168. (In Russ)
3. Mamdani E.H., Assilian S. A fuzzy logic controller for a dynamic plant. Int. J. Man-Machine Stud., 1975; 7:1-13.
4. <https://neuronus.com/theory/fl/308-nechetkie-vyvody.html>
5. Asai K., Watada D., Iwai S., etc. Applied fuzzy systems : trans. from jap. М. : Mir, 1993. (In Russ)
6. Magomedov I. A. Mathematical and hardware support for logical and linguistic control models of complex dynamic objects / I. A. Magomedov, G. H. Irzaev. – Makhachkala : Typography FORMAT, 2022; 159. ISBN 978-5-907484-61-0. – EDN SCTFFI. (In Russ)
7. Asai K., Watada D., Iwai S., etc. Applied fuzzy systems : trans. from jap. М. : Mir, 1993. (In Russ)
8. R. Mochalov, A. Khudov, A. Yazev. Automation of the network of gas distribution stations based on the software and hardware complex "KaskadSAU". STA 2/2008: 36-45(In Russ)
9. <https://www.cta.ru/articles/cta/otrasli/neftegazovaya-promyshlennost/125021/>
10. <https://vega-gaz.ru/Products/saugrsriusgrs>
11. https://newgaztech.ru/upload/files/catalog_file/7b24e7e1589942d24b94aa33cf8f029b.pdf
12. <https://makhachkala.lcbit.ru/blog/chto-takoe-scada-sistema/>
13. Maksimova, E. A. The use of SCADA technologies in modern automated control systems / E. A. Maksimova, S. N. Gritsyuk. -Text : direct. *Young scientist*. 2015;22.5(102.5):45-48. - URL: <https://moluch.ru/archive/102/23624/> / (date of access: 04/03/2024). (In Russ)
14. Magomedov A.I. Intelligent trajectory control system for a marine mobile object and object classification. *Marine Intelligent Technologies* 2024; 2(1): 208-218 (In Russ)

Сведения об авторах:

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

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

Усманов Майрбек Ширванович, начальник производственного отдела метрологического обеспечения; adm@grozny-tr.gazprom.ru

Information about authors:

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

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

Mayrbek Sh. Usmanov, Head of the Production Department of Metrological Support; adm@grozny-tr.gazprom.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/ Reviced 20.05.2024.

Принята в печать/Accepted for publication 20.05.2024.

Качество методов трекинга с реидентификацией объектов
Н.А. Мальцева, А.А.Полозов, Н.В. Папуловская, С.Л.Гольдштейн

Уральский федеральный университет,
620014, г. Екатеринбург, ул. Мира 19, Россия

Резюме. Цель. В настоящей работе представлены исследования алгоритмов отслеживания объектов для анализа спортивных соревнований с минимально допустимым количеством кадров в секунду без критической потери качества систем эксплуатации. Цель исследования заключается в определении оптимального метода отслеживания и модели реидентификации при увеличении интервала времени между кадрами. **Метод.** В ходе исследования использовали датасеты Re-Identification MSMT17, Market1501, DukeMTMC-reID; специализированные нейронные сети OsNet, ResNet и MobileNet. Алгоритмы трекинга BotSort, Bytetrack, OcSort, DeepOcSort, StrongSort. Применяли метрику качества NOTA и IDF1. **Результат.** Показатели метрик проведенных экспериментов в целом достаточно низкие, что связано с нелинейностью передвижения спортсменов в отличие от движения пешеходов и большим количеством изменений их позы. **Вывод.** В зависимости от степени сжатия информации оптимальными методами отслеживания, при использовании предобученных моделей реидентификации, являются ByteTrack и OcSort.

Ключевые слова: анализ, датасеты, показатели FPS, реидентификация, трекинг

Для цитирования: Н.А. Мальцева, А.А. Полозов, Н.В. Папуловская, С.Л. Гольдштейн. Качество методов трекинга с реидентификацией объектов. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2024; 51(3):103-109. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-3-103-109

Quality of tracking methods with object reidentification
N.A. Maltseva, A.A. Polozov, N.V. Papulovskaya, S.L. Goldstein

Ural Federal University,
19 Mira St., Ekaterinburg 620014, Russia

Abstract. Objective. This paper presents a study of object tracking algorithms for analyzing sports competitions with a minimum permissible number of frames per second without critical loss of quality of operational systems. The purpose of the study is to determine the optimal tracking method and reidentification model with an increase in the time interval between frames. **Method.** The study used the Re-Identification MSMT17, Market1501, DukeMTMC-reID datasets; specialized neural networks OsNet, ResNet and MobileNet. Tracking algorithms BotSort, Bytetrack, OcSort, DeepOcSort, StrongSort. The NOTA and IDF1 quality metrics were used. **Result.** The metrics of the experiments are generally quite low, which is due to the nonlinearity of athletes' movement, unlike pedestrians' movement, and a large number of changes in their posture. **Conclusion.** Depending on the degree of information compression, the optimal tracking methods when using pre-trained reidentification models are ByteTrack and OcSort.

Keywords: analysis, datasets, FPS indicators, reidentification, tracking

For citation: N.A. Maltseva, A.A. Polozov, N.V. Papulovskaya, S.L. Goldstein. Quality of tracking methods with object reidentification. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2024;51(3):103-109. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-3-103-109

Введение. Современные возможности отслеживания объектов во многом зависят от базового оборудования. Высокая точность достигается при обработке большого количе-

ства данных, однако в этом случае система становится требовательной к вычислительным ресурсам, увеличивается время работы программы. Это недопустимо в случае анализа видеотрансляции в онлайн режиме, так как может вызвать слишком большую задержку при обработке информации. Одно из возможных решений проблемы увеличения скорости работы – максимальное сокращения количества поступающей информации с минимальной потерей качества функционирования системы.

Статьи о реидентификации лица (Re-ID) [1-3, 5-7] посвящены повышению точности моделей Re-ID, целью которых является идентифицировать одного и того же человека на разных камерах или в непоследовательных кадрах видео. Они исследуют различные методы, такие как совместное внимание, адаптация предметной области и обобщаемые представления. В работе [10] представлена библиотека для реализации моделей Re-ID глубокого обучения с помощью PyTorch. В [4] предлагаются показатели производительности и набор данных для оценки алгоритмов многоклассового отслеживания MOT. В статьях [11 - 16] рассматриваются аспекты по повышению производительности алгоритмов MOT, которые отслеживают несколько объектов в видеокдрах. Они исследуют различные методы ассоциации, повторной идентификации и решения таких проблем, как окклюзия и движение камеры.

В работе [8] представлена широко используемая архитектура глубокого остаточного обучения для распознавания изображений. В случае с видеоданными сокращение информации возможно с уменьшением количества кадров, поступающих за единицу времени (FPS). Однако алгоритмы, которые лежат в основе методов отслеживания объектов (трекинг) особенно чувствительны к степени изменения сходства объекта, которая увеличивается при сокращении FPS. В таком случае важно использовать наиболее устойчивые методы трекинга с возможностью верификации данных (реиндификацией).

В основе таких методов лежат нейронные сети, предобученные на размеченных данных в ручную (GT). Значение FPS в таких моделях, как правило, равно 25 кадрам в секунду. В работе представлены результаты исследования алгоритмов DeepOcSort, OcSort, ByteTrack, BotSort, StrongSort с использованием предобученных моделей OsNet, ResNet, Mobilenet на датасетах MSMT17, Market1501, Duke с минимальными показателями FPS – 8 и 12. Для оценки качества методов трекинга было вручную размечено видео баскетбольной игры с последующим сохранением данных при разных параметрах FPS.

Постановка задачи. Современные системы отслеживания объектов (трекинга) демонстрируют высокую точность, но зачастую требуют значительных вычислительных ресурсов. Это ограничивает их применение в задачах, где требуется обработка видео в реальном времени, например, при анализе спортивных трансляций.

В работе исследуется влияние уменьшения частоты кадров (FPS) на эффективность алгоритмов отслеживания объектов (трекинга) с реиндификацией. Авторы тестируют пять алгоритмов трекинга (DeepOcSort, OcSort, ByteTrack, BotSort, StrongSort) с использованием предобученных моделей OsNet, ResNet, MobileNet на трех датасетах (MSMT17, Market1501, Duke) при FPS 8 и 12. Высокая частота кадров (FPS) видеопотока, необходимая для точного трекинга, приводит к увеличению объема данных и, следовательно, к повышенным требованиям к вычислительным ресурсам. Это может привести к задержкам в обработке информации, что недопустимо в ряде случаев. Снижение FPS видеопотока может стать одним из способов оптимизации работы систем трекинга. Однако это может привести к снижению точности, так как алгоритмы трекинга чувствительны к степени изменения сходства объекта между кадрами.

Целью исследования является определение влияния снижения FPS на эффективность алгоритмов трекинга с реидентификацией объектов.

В ходе исследования были поставлены и решены следующие задачи: провести сравнительный анализ алгоритмов трекинга DeepOcSort, OcSort, ByteTrack, BotSort и StrongSort при использовании предобученных моделей OsNet, ResNet и MobileNet;

оценить влияние FPS на качество трекинга при значениях 8 и 12 кадров в секунду; собрать и разметить вручную видео баскетбольной игры для оценки качества трекинга.

Методы исследования. В работе впервые проводится комплексное исследование влияния FPS на эффективность алгоритмов трекинга с реидентификацией объектов в контексте спортивных трансляций.

MSMT17 – разнородная датасет, состоящая из видео с 12 разных уличных камер и 3 камер в помещениях. Так же в ней собраны видео с различными погодными условиями, в разное время суток. Окончательный набор необработанных видео содержит 180 часов видео, 12 наружных камер, 3 внутренних камеры и 12 временных.

Market1501 – одна из наиболее крупных общедоступных датасетов пешеходов. Содержит 1501 различных последовательностей, снятых 6 камерами, и 32 668 ограничивающих рамок изображений пешеходов, полученных с помощью детектора пешеходов Deformable Part Models. У каждого человека в среднем имеется 3,6 изображений с каждой точки обзора [3].

DukeMTMC-reID (Duke Multi-Tracking Multi-Camera ReIDentification) версия датасета DukeMTMC с добавлением информации о трекинге [4]. Она состоит из изображений пешеходов с 8 разных камер. Все последовательности вырезаны в ручную. Является одним из крупнейших наборов данных. Содержит 702 изображения разных личностей. Набор составляет около 16 000 обучающих изображений.

OsNet – это специализированная нейронная сеть, предназначенная для реидентификации объектов на последовательности данных [5]. Цель данной архитектуры – устойчивое к масштабным и аффинным преобразованиям, сопоставления одного и того же объекта на нескольких кадрах. Основная её особенность – OS блоки, в которых к одному участку изображения сначала применяют несколько масштабных преобразований (Lite 3×3) с разными коэффициентами масштаба, затем агрегируют их с помощью функции ReLU в одно рецептивное поле. Для сравнения та же архитектура сети со стандартными сверточными блоками имеет 6,9 миллионов параметров и 3384,9 миллиона операций множественного добавления, что в 3 раза больше, чем OSNet с дизайном слоя свертки Lite 3×3. Так же в работе сравнивались модели ResNet и MobileNet подробно описанные в работах [8, 9].

Многие современные алгоритмы трекинга используют модели движения. Обычно такие модели используют байесовскую оценку для прогнозирования следующего состояния путем максимизации апостериорной оценки. Как одна из самых классических моделей движения, фильтр Калмана (KF) представляет собой рекурсивную оценку положения объектов на следующих кадрах на основе его положения на последнем кадре. Данный метод ограничен предположением линейности передвижения объектов. В связи с этим решение этого ограничения образовала семейство алгоритмов с различными подходами.

BotSort добавляет компенсацию движения камеры (СМС), благодаря чему прогнозируемое положение объектов не опережает и не отстает, когда цель движется с неравномерной скоростью [11].

В основе метода ByteTrack лежит принцип сравнения, как боксов в высокой степени уверенности, так и с низкой [12]. Это позволяет не терять ассоциации при пересечении объектов или в случаях, когда объект находится в зоне плохой видимости. ByteTrack использует сиамскую сетевую архитектуру, которая принимает два входных кадра и выводит оценку подобию, указывающую, одинаковые ли объекты в двух кадрах.

OcSort – это расширенная версия алгоритма Sort в которой ограничения основанные на предположении о линейности передвижения объектов, компенсируют за счет повторного обновления параметров фильтра Калмана, основанных на траектории построенной исходя из положения объекта перед его потерей и после его появления [13, 14].

DeepOcSort основан на OcSort алгоритме с добавлением модуля компенсации движения камеры для более точного определения локализации объектов [15].

StrongSort – основан на методе DeepSort [16]. В обновленной версии вместо исходной сверточной нейронной сети применяется более мощный экстрактор признаков внешнего вида – VoT, который может извлекать гораздо больше отличительных признаков. Так же в нем для компенсации движения камеры используется модель максимизации коэффициента корреляции (ЕСС). Это метод параметрического выравнивания изображения, который может оценить глобальное вращение и трансляция между соседними кадрами.

Обсуждение результатов. Для оценки точности алгоритмов отслеживания использовалась метрика НОТА, как баланс между тремя показателями: детекция, ассоциация и локализация [17] (табл. 1, 2). В её основе лежит индекс Жакара, позволяющий отражать степень схожести двух векторов: массива целевых показателей и предсказанных.

Таблица 1. Метрики качества алгоритмов с FPS=12
Table 1. Quality metrics of algorithms with FPS =12

Track	ReId Model	НОТА	IDF1
	<i>OsNet</i>		
botsort	osnet_market1501	47.156	51.66
	osnet_dukemtmcrid	47.217	51.618
	osnet_msmt17	47.192	51.576
bytetrack	osnet_market1501	48.224	53.163
	osnet_dukemtmcrid	48.224	53.163
	osnet_msmt17	48.224	53.163
deepocsort	osnet_market1501	47.313	52.623
	osnet_dukemtmcrid	47.313	52.623
	osnet_msmt17	47.313	52.623
ocsort	osnet_market1501	47.351	52.665
	osnet_dukemtmcrid	47.351	52.665
	osnet_msmt17	47.351	52.665
strongsort	osnet_market1501	45.975	51.155
	osnet_dukemtmcrid	46.016	51.113
	osnet_msmt17	45.984	50.99
MobileNet			
botsort	mobilenetv2_market1501	47.217	51.618
	mobilenetv2_dukemtmcrid	47.217	51.618
	mobilenetv2_msmt17	47.217	51.618
bytetrack	mobilenetv2_market1501	48.224	53.163
	mobilenetv2_dukemtmcrid	48.224	53.163
	mobilenetv2_msmt17	48.224	53.163
deepocsort	mobilenetv2_market1501	47.313	52.623
	mobilenetv2_x1_4_dukemtmcrid	47.313	52.623
	mobilenetv2_x1_4_msmt17	47.313	52.623
ocsort	mobilenetv2_x1_4_market1501	47.351	52.665
	mobilenetv2_x1_4_dukemtmcrid	47.351	52.665
	mobilenetv2_x1_4_msmt17	47.351	52.665
strongsort	mobilenetv2_x1_4_market1501	45.997	51.155
	mobilenetv2_x1_4_dukemtmcrid	45.997	51.032
	mobilenetv2_x1_4_msmt17	45.968	50.99
ResNet			
botsort	resnet50_fc512_msmt17	47.217	51.618
bytetrack	resnet50_fc512_msmt17	48.224	53.163
deepocsort	resnet50_fc512_msmt17	47.313	52.623
ocsort	resnet50_fc512_msmt17	47.351	52.665
strongsort	resnet50_fc512_msmt17	45.888	50.825

В качестве дополнительной метрики использовалась IDF1, которая в большей степени отражает качество реиндификации объектов (табл. 1, 2).

Для оценки качества алгоритмов трекинга был вручную размечен фрагмент из баскетбольной игры. Всего детекций на видео – 201, уникальных объектов – 41. Результаты проведенных экспериментов показали, что домен отслеживания пешеходов значительно отличается от домена спортсменов. Это может быть связано с нелинейностью передвижения спортсменов в отличие от движения пешеходов. Также спортивная форма дает меньше уникальных свойств для объекта, чем одежда человека на улице. А при большом количестве изменений позы, могут быть скрыты те немногочисленные отличия, которые модель извлекает из изображения для реидентификации. Поэтому показатели метрик проведенных экспериментов в целом достаточно низкие.

Таблица 2. Метрики качества алгоритмов с FPS=8
Table 2. Quality metrics of algorithms with FPS =8

Track	ReId Model	HOTA	IDF1
	OsNet		
botsort	Osnet_market1501	18.044	14.693
	osnet_dukemtmcrid	18.061	14.715
	osnet_msmt17	18.079	14.715
bytetrack	osnet_market1501	18.133	16.024
	osnet_dukemtmcrid	18.133	16.024
	osnet_msmt17	18.133	16.024
deepocsort	osnet_market1501	17.725	14.912
	osnet_dukemtmcrid	17.846	14.912
	osnet_msmt17	17.725	14.912
ocsort	osnet_market1501	18.593	16.035
	osnet_dukemtmcrid	18.593	16.035
	osnet_msmt17	18.593	16.035
strongsort	osnet_market1501	17.264	14.574
	osnet_dukemtmcrid	17.185	14.219
	osnet_msmt17	17.33	14.241
	MobileNet		
botsort	mobilenetv2_market1501	18.061	14.715
	mobilenetv2_dukemtmcrid	18.029	14.715
	mobilenetv2_msmt17	18.032	14.693
bytetrack	mobilenetv2_market1501	18.133	16.024
	mobilenetv2_dukemtmcrid	18.133	16.024
	mobilenetv2_msmt17	18.133	16.024
deepocsort	mobilenetv2_market1501	17.725	14.912
	mobilenetv2_dukemtmcrid	17.846	14.912
	mobilenetv2_msmt17	17.725	14.912
ocsort	mobilenetv2_market1501	18.593	16.035
	mobilenetv2_dukemtmcrid	18.593	16.035
	mobilenetv2_msmt17	18.593	16.035
strongsort	mobilenetv2_market1501	17.278	14.574
	mobilenetv2_dukemtmcrid	17.055	13.91
	mobilenetv2_msmt17	17.328	14.551
	ResNet		
botsort	resnet50_msmt17	18.061	14.715
bytetrack	resnet50_msmt17	18.133	16.024
deepocsort	resnet50_msmt17	17.725	14.912
ocsort	resnet50_fc512_msmt17	18.593	16.035
strongsort	resnet50_fc512_msmt17	17.218	14.286

Так же следует отметить, что метрики моделей, обученные на рассмотренных выше наборах данных, не сильно отличаются друг от друга в рамках одного метода трекинга. Это может быть связано с высокой корреляцией данных между ними.

При $\text{fps} = 12$ максимальное значение Nota достигнуто методом ByteTrack не зависимо от модели реидентификации. Максимальное значение IdF1 также достигнуто методом ByteTrack. Метод хорошо работает с объектами с низкой вероятностью, но требует повышенного fps для сопоставления объектов (табл. 1).

При $\text{fps} = 8$ максимальное значение Nota достигнуто методом OcSort с использованием архитектуры MobileNet и OsNet для извлечения признаков. Максимальное значение IdF1 также достигнуто методом OcSort с использованием набора данных Market1501 (табл. 2). Это говорит нам о том, что метод OcSort больше ориентирован на нелинейность траектории передвижения и большие временные интервалы между кадрами.

Вывод. Результаты экспериментов показали, что в зависимости от степени сжатия информации оптимальными методами отслеживания при использовании предобученных моделей реидентификации являются ByteTrack и OcSort.

Результаты работы могут быть использованы для оптимизации систем трекинга объектов в задачах, где требуется обработка видео в реальном времени, например, при анализе спортивных трансляций.

В дальнейших исследованиях планируется расширение набора размеченных данных для обучения моделей реидентификации объектов и получения более высоких показателей качества алгоритмов трекинга.

Библиографический список:

1. H. Masson, A. Bhuiyan, L. Th. Nguyen-Meidine, M. Javan, P. Siva, I. B. Ayed, E. Granger, «Использование Prunability для повторной идентификации личности», 2021, arXiv:1907.02547.
2. L. Wu, Y. Wang, J. Gao, D. Tao, «Глубокие компараторы на основе совместного внимания для обучения относительноному представлению при повторной идентификации личности», 2018, arXiv:1804.11027.
3. L. Wei, S. Zhang, W. Gao, Qi Tian, «GAN для переноса личности в мост доменного разрыва для повторной идентификации личности», 2018, arXiv:1711.08565.
4. E. Ristani, F. SoleraRoger, Z. Cucchiara и С. Tomasi, «Показатели производительности и набор данных для многоцелевого многокамерного отслеживания», в ECCV Workshop on Benchmarking Multi-Target Tracking, 2016, стр. 17–35.
5. K. Zhou, Y. Yang, A. Cavallaro, T. Xiang, «Изучение обобщенных многомасштабных представлений для повторной идентификации личности», 2021, arXiv:1910.06827.
6. L. Zheng, S. Wang, L. Shen, L. Tian, J. Bu, Q. Tian, «Повторная идентификация личности встречается с поиском изображений», 2015, arXiv:1502.02171.
7. W. Li, R. Zhao, T. Xiao, X.G. Wang, «DeepReID: Глубокая фильтрация парных нейронных сетей для повторной идентификации личности», 2014, DOI:10.1109/CVPR.2014.27.
8. K. He, X. Zhang, Shaoqing Ren, Jian Sun, «Глубокое остаточное обучение для распознавания изображений», 2015, arXiv:1512.03385.
9. M. Sandler, A. Howard, M. Zhu, A. Zhmoginov, L.-C. Chen, «MobileNetV2: инвертированные остатки и линейные узкие места», 2018, arXiv:1801.04381.
10. K. Zhou, T. Xiang, «Torchreid: библиотека для глубокого обучения повторной идентификации человека в Pytorch», 2019, arXiv:1910.10093.
11. N. Aharon, R. Orfaig, B.-Z. Bobrovsky, «BoT-SORT: надежные ассоциации отслеживания нескольких пешеходов», 2022, arXiv:2206.14651.
12. Y. Zhang, P. Sun, Y. Jiang, D. Yu, F. Weng, Z. Yuan, P. Luo, W. Liu, X. Wang. «ByteTrack: отслеживание нескольких объектов путем связывания каждого поля обнаружения», 2022, arXiv:2110.06864v3.
13. J. Cao, J. Pang, X. Weng, R. Khirodkar, K. Kitani, «SORT, ориентированная на наблюдение: пересмысление SORT для надежного отслеживания нескольких объектов», 2023, arXiv:2203.14360
14. N. Wojke, A. Bewley, D. Paulus, «Простое отслеживание в режиме онлайн и в реальном времени с глубокой метрикой ассоциации», ICIP. IEEE, 2017, стр. 3645–3649.
15. G. Maggolino, A. Ahmad, J. Cao, K. Kitani, «Deep OC-SORT: отслеживание нескольких пешеходов с помощью адаптивной повторной идентификации», 2023, arXiv:2302.11813v1
16. Y. Du, Z. Zhao, Y. Song, Y. Zhao, F. Su, T. Gong, H. Meng, «StrongSORT: снова делаем DeepSORT великим», 2023, arXiv:2202.13514v2
17. J. Luiten, A. Osep, P. Dendorfer, P. Torr, A. Geiger, L. Leal-Taixe, B. Leibe, «НОТА: высший порядок Метрика для оценки отслеживания нескольких объектов. International Journal of Computer Vision», International Journal of Computer Vision, стр. 548–578, 2021.

References:

1. H. Masson, A. Bhuiyan, L. Th. Nguyen-Meidine, M. Javan, P. Siva, I. B. Ayed, E. Granger, "Exploiting Prunability for Person Re-Identification", 2021; arXiv:1907.02547.
2. L. Wu, Y. Wang, J. Gao, D. Tao, "Deep Co-attention based Comparators For Relative Representation Learning in Person Re-identification", 2018; arXiv:1804.11027.
3. L. Wei, S. Zhang, W. Gao, Qi Tian, "Person Transfer GAN to Bridge Domain Gap for Person Re-Identification", 2018; arXiv:1711.08565.
4. E. Ristani, F. Solera, Z. Cucchiara, and C. Tomasi, "Performance measures and a data set for multi-target, multi-camera tracking," in ECCV Workshop on Benchmarking Multi-Target Tracking, 2016; 17 – 35.
5. K. Zhou, Y. Yang, A. Cavallaro, T. Xiang, "Learning Generalisable Omni-Scale Representations for Person Re-Identification", 2021; arXiv:1910.06827.
6. L. Zheng, S. Wang, L. Shen, L. Tian, J. Bu, Q. Tian, "Person Re-identification Meets Image Search", 2015; arXiv:1502.02171.
7. W. Li, R. Zhao, T. Xiao, X.G. Wang, "DeepReID: Deep Filter Pairing Neural Network for Person Re-Identification", 2014, DOI:10.1109/CVPR.2014.27.
8. K. He, X. Zhang, Shaoqing Ren, Jian Sun, "Deep Residual Learning for Image Recognition", 2015; arXiv:1512.03385.
9. M. Sandler, A. Howard, M. Zhu, A. Zhmoginov, L.-C. Chen, "MobileNetV2: Inverted Residuals and Linear Bottlenecks", 2018; arXiv:1801.04381.
10. K. Zhou, T. Xiang, "Torchreid: A Library for Deep Learning Person Re-Identification in Pytorch", 2019; arXiv:1910.10093.
11. N. Aharon, R. Orfaig, B.-Z. Bobrovsky, "BoT-SORT: Robust Associations Multi-Pedestrian Tracking", 2022; arXiv:2206.14651.
12. Y. Zhang, P. Sun, Y. Jiang, D. Yu, F. Weng, Z. Yuan, P. Luo, W. Liu, X. Wang. "ByteTrack: Multi-Object Tracking by Associating Every Detection Box", 2022; arXiv:2110.06864v3.
13. J. Cao, J. Pang, X. Weng, R. Khirodkar, K. Kitani, "Observation-Centric SORT: Rethinking SORT for Robust Multi-Object Tracking", 2023; arXiv:2203.14360
14. N. Wojke, A. Bewley, D. Paulus, "Simple online and realtime tracking with a deep association metric", ICIP. IEEE, 2017; 3645 – 3649.
15. G. Maggolino, A. Ahmad, J. Cao, K. Kitani, "Deep OC-SORT: Multi-Pedestrian Tracking by Adaptive Re-Identification", 2023; arXiv:2302.11813v1
16. Y. Du, Z. Zhao, Y. Song, Y. Zhao, F. Su, T. Gong, H. Meng, "StrongSORT: Make DeepSORT Great Again", 2023; arXiv:2202.13514v2
17. J. Luiten, A. Osep, P. Dendorfer, P. Torr, A. Geiger, L. Leal-Taixe, B. Leibel, "HOTA: A Higher Order Metric for Evaluating Multi-object Tracking. International Journal of Computer Vision", International Journal of Computer Vision, 2021; 548 – 578.

Сведения об авторах:

Мальцева Наталья Анатольевна, инженер, Natalia.maltseva.susu@gmail.com

Полозов Андрей Анатольевич, доктор педагогических наук, профессор кафедры информационных технологий и систем управления; a.a.pozozov@mail.ru

Папуловская Наталья Владимировна, кандидат педагогических наук, доцент кафедры информационных технологий и систем управления; n.v.papulovskaia@urfu.ru; ORCID 000-0001-7407-1491

Гольдштейн Сергей Людвигович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технической физики; s.l.goldshtein@urfu.ru

Information about authors:

Natalya A. Maltceva, Engineer; Natalia.maltseva.susu@gmail.com

Andrey A. Polozov, Dr. Sci. (Pedagogical), Prof., Department of Information Technologies and Control Systems; a.a.pozozov@mail.ru

Natalya V. Papulovskaya; Cand. Sci. (Pedagogical); Assoc. Prof., Department of Information Technologies and Control Systems; n.v.papulovskaia@urfu.ru; ORCID 000-0001-7407-149

Sergey L. Goldshtein, Dr. Sci. (Eng), Prof., Prof., Department of Technical Physics; s.l.goldshtein@urfu.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/ Received 20.03.2024.

Одобрена после рецензирования / Revised 02.05.2024.

Принята в печать / Accepted for publication 02.05.2024.

**Исследование способов повышения безопасности корпоративных сетей
Н.Ф. Махмутова, Э.В. Бирих, Д.В. Сахаров, А.С. Кривец, М.А. Дегтярев**

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций

им. проф. М.А. Бонч-Бруевича,

193232, г. Санкт-Петербург, пр. Большевиков 22, Россия

Резюме. Цель. В статье представлены результаты исследования способа повышения безопасности корпоративной сети путем использования техники подмены адресов отправителя при пересылке пакетов между компьютерами. **Метод.** В процессе исследования были использованы методы анализа сетевого трафика, программирование на уровне сетевого протокола и алгоритмы обработки пакетов данных. Компьютеры в сети подключены к одному серверу, через который происходит общение. При пересылке пакетов между компьютерами сети подменяется адрес отправителя, а при приеме пакета другим компьютером пакет разбирается, и внутри него находится настоящий адрес отправителя. **Результат.** Предложенный способ позволяет эффективно защитить корпоративную сеть от атак, связанных с подделкой адресов отправителей пакетов данных. **Вывод.** Использование техники подмены адресов отправителя при передаче данных в корпоративной сети является эффективным способом повышения безопасности и защиты от внешних угроз. Дальнейшие исследования будут направлены на разработку более сложных и надежных методов защиты сетей.

Ключевые слова: информационная безопасность, беспроводные сети, проводные сети, корпоративные сети, ip-адрес

Для цитирования: Н.Ф. Махмутова, Э.В. Бирих, Д.В. Сахаров, А.С. Кривец, М.А. Дегтярев. Исследование способов повышения безопасности корпоративных сетей. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2024; 51(3):110-116. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-3-110 -116

Research of ways to improve the security of corporate networks

N.F. Makhmutova, E.V. Birikh, D.V. Sakharov, A.S. Krivets, M.A. Degtyarev

M.A. Bonch-Bruevich St. Petersburg State University of Telecommunications,

22 Bolshevikov Ave., St. Petersburg 193232, Russia

Abstract. Objective. The article explores a way to improve the security of a corporate network by using the technique of spoofing sender addresses when forwarding packets between computers. **Method.** Network traffic analysis methods, network protocol level programming and data packet processing algorithms are used. Computers on the network are connected to one server. When sending packets between computers in the network, the sender's address is replaced, and when a packet is received by another computer, the packet is disassembled, and the real sender's address is inside it. **Result.** The method allows for effective protection of a corporate network from attacks associated with the forgery of addresses of data packet senders. **Conclusion.** Using the sender address substitution technique when transmitting data in a corporate network is an effective way to increase security and protection from external threats. Further research is aimed at developing complex and reliable methods for protecting networks.

Keywords: information security, wireless, wired and corporate networks, ip address

For citation: N.F. Makhmutova, E.V. Birikh, D.V. Sakharov, A.S. Krivets, M.A. Degtyarev. Research of ways to improve the security of corporate networks. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2024;51(3):110-116. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-3-110-116

Введение. В настоящее время беспроводные сети становятся все более популярными и широко используются как в домашних условиях, так и в корпоративной среде. Благодаря удобству и мобильности, которые они предоставляют, беспроводные сети стали неотъемлемой частью нашей повседневной жизни. Однако, вместе с увеличением использования беспроводных технологий возрастает и угроза для безопасности информации.

Защита корпоративных сетей становится все более важной, поскольку они содержат конфиденциальные данные, финансовую информацию и другие ценные ресурсы компании. Нарушение безопасности корпоративной сети может привести к серьезным последствиям, таким как утечка конфиденциальных данных, нарушение работы бизнес-процессов и финансовые потери. В статье обоснована актуальность проблемы защиты корпоративных сетей от атак, связанных с использованием техники подмены адресов отправителя, предложены методы и решения для обеспечения безопасности сети. Также рассмотрены примеры из практики и статистические данные, подтверждающие необходимость принятия мер по защите корпоративных сетей от подобных угроз.

Постановка задачи. Для повышения безопасности корпоративных сетей от угроз, связанных с конфигурацией сети, таких как перехват трафика и атаки на слабые места сети необходимо использовать технологию подмены адреса отправителя, чтобы общение устройств в сети выглядело хаотично.

Применение технологии подмены адреса отправителя позволяет эффективно затруднить возможность идентификации и отслеживания устройств в сети, что делает ее более защищенной от злоумышленников [1, 20]. Кроме того, использование подмены адреса отправителя способствует обеспечению конфиденциальности данных и защите приватности пользователей. Важным аспектом при внедрении этой технологии является правильная настройка системы и контроль за ее работой, чтобы избежать возможных негативных последствий и обеспечить стабильную и безопасную работу корпоративной сети [1-4].

Методы исследования. Для оценки эффективности технологии подмены адреса отправителя был проведен эксперимент в небольшой корпоративной сети. Для проведения эксперимента необходимы 5 устройств, находящихся в одной локальной сети. Одно из устройств будет выступать в качестве сервера, остальные же будут выступать в качестве клиентов, которые будут обмениваться данными. В качестве операционной системы для эксперимента была выбрана Ubuntu 22.04.

Описание предварительной настройки устройств:

1. Установить Python3: Язык программирования Python использовался для написания программ, которые будут запущены как на клиентах, так и на сервере;

2. Установить библиотеку Scapy для Python3: Библиотека Scapy используется для формирования сетевых пакетов, их модификации, обработки и отправки;

3. Установить программу Wireshark: Программа Wireshark используется для анализа сетевого трафика в реальном времени или из захваченных файлов захвата (pcap). В рамках эксперимента эта программа будет использоваться для анализа трафика, передаваемого в процессе обмена данными между клиентами;

4. Внести изменения в настройки утилиты sysctl: Утилита sysctl используется для динамической настройки параметров ядра во время работы системы.

В рамках данного эксперимента будут модифицированы сетевые настройки, отвечающие за отправку пакетов повторной передачи TCP-соединения (TCP retransmission):

```
sudo sysctl -w net.ipv4.tcp_retries1=0 и sudo sysctl -w net.ipv4.tcp_retries2=0
```

5. Внести изменения в настройки утилиты iptables: Утилита iptables используется для управления брандмауэром, для настройки правил фильтрации пакетов входящего и исходящего трафика, а также преобразования сетевых пакетов [8-10]. В рамках данного эксперимента будут блокироваться исходящие пакеты сброса TCP-соединения (TCP reset), отправляемые не с помощью Scapy:

```
sudo iptables -A OUTPUT -p tcp --tcp-flags RST RST -j DROP
```

```
sudo iptables -A OUTPUT -p tcp --sport 5000 --tcp-flags RST RST -j ACCEPT
```

6. На устройство, выступающее в роли сервера, необходимо загрузить программу server.py.

7. На устройства, выступающие в роли клиентов, необходимо загрузить программу client.py.

Эксперимент проведен в следующей последовательности:

Этап 1 – «Моделирование обмена данными между устройствами без использования механизма подмены ip-адресов».

1. На устройстве, выступающем в роли сервера, необходимо запустить программу server.py со следующими настройками: `sudo server.py prod unix unsafe`

Эта команда запустит программу для инициализации устройства-сервера в режиме без подмены ip-адресов для устройств с операционной системой семейства UNIX.

2. На устройстве, выступающем в роли сервера, необходимо запустить программу wireshark и выбрать интерфейс, указанный в командной строке при инициализации программы server.py, а также применить фильтр для отображения только TCP-пакетов, взаимодействующих с портом 5000 (этот порт используется программой в качестве порта, который прослушивает устройство-сервер для соединения с устройствами-клиентами): `tcp && tc.port == 5000`

3. На устройствах, выступающих в роли клиентов, необходимо запустить программу client.py со следующими настройками: `sudo client.py prod unix unsafe`. Эта команда запустит программу для инициализации устройств-клиентов в режиме без подмены ip-адресов для устройств с операционной системой семейства UNIX.

4. С любого устройства, выступающего в роли клиента, необходимо отправить текстовые данные, которые будут пересланы остальным клиентам, подключенным в данный момент к устройству-серверу.

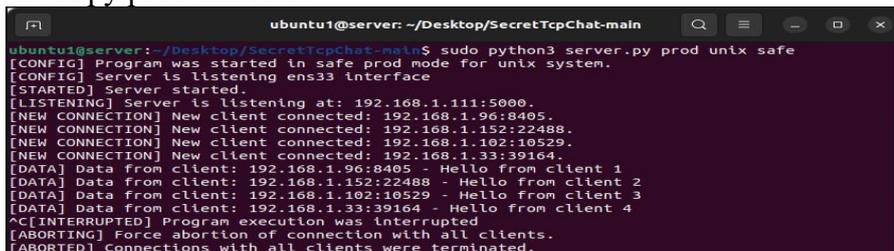
5. Изучить захваченный с помощью программы wireshark сетевой трафик.

После описанных шагов можно завершать работу программ server.py, client.py и wireshark.

Этап 2 – «Моделирование обмена данными между устройствами с использованием механизма подмены ip-адресов».

1. На устройстве, выступающем в роли сервера, необходимо запустить программу server.py со следующими настройками, представленными на рис. 1.

`sudo server.py prod unix safe`



```
ubuntu1@server: ~/Desktop/SecretTcpChat-main
ubuntu1@server:~/Desktop/SecretTcpChat-main$ sudo python3 server.py prod unix safe
[CONFIG] Program was started in safe prod mode for unix system.
[CONFIG] Server is listening ens33 interface
[STARTED] Server started.
[LISTENING] Server is listening at: 192.168.1.111:5000.
[NEW CONNECTION] New client connected: 192.168.1.96:8405.
[NEW CONNECTION] New client connected: 192.168.1.152:22488.
[NEW CONNECTION] New client connected: 192.168.1.102:10529.
[NEW CONNECTION] New client connected: 192.168.1.33:39164.
[DATA] Data from client: 192.168.1.96:8405 - Hello from client 1
[DATA] Data from client: 192.168.1.152:22488 - Hello from client 2
[DATA] Data from client: 192.168.1.102:10529 - Hello from client 3
[DATA] Data from client: 192.168.1.33:39164 - Hello from client 4
^C[INTERRUPTED] Program execution was interrupted
[ABORTING] Force abortion of connection with all clients.
[ABORTED] connections with all clients were terminated.
```

Рис. 1. Запуск сервера
Fig. 1. Starting the server

Эта команда запустит программу для инициализации устройства-сервера в режиме с подменой ip-адресов для устройств с операционной системой UNIX.

2. На устройстве, выступающем в роли сервера, необходимо запустить программу wireshark и выбрать интерфейс, указанный в командной строке при инициализации программы client.py, а также применить фильтр для отображения только TCP-пакетов, взаимодействующих с портом 5000 (этот порт используется программой в качестве порта, который прослушивает устройство-сервер для соединения с устройствами-клиентами): `tcp && tc.port == 5000`

3. На устройствах, выступающих в роли клиентов, необходимо запустить программу client.py со следующими настройками, представлено на рис. 2.

`sudo client.py prod unix safe`

```

ubuntu1@client1: ~/Desktop/SecretTcpChat-main
ubuntu1@client1:~/Desktop/SecretTcpChat-main$ sudo python3 client.py prod unix safe
Enter ip of server you want to connect: 192.168.1.111
[CONFIG] Program was started in safe prod mode for unix system.
[CONFIG] client is sending data via ens33 interface
[STARTED] Client 192.168.1.96:8495 started.
[CONNECTING] connecting to server 192.168.1.111:5000...
[CONNECTED] Connected to server 192.168.1.111:5000.
Client 192.168.1.152:22488 connected to server!
Client 192.168.1.102:10529 connected to server!
Client 192.168.1.33:39164 connected to server!
Hello from client 1
<192.168.1.152:22488> - Hello from client 2
<192.168.1.102:10529> - Hello from client 3
<192.168.1.33:39164> - Hello from client 4
[TERMINATED] Server 192.168.1.111:5000 terminated connection
    
```

Рис. 2. Запуск клиента
 Fig. 2. Starting the client

Эта команда запустит программу для инициализации устройств-клиентов в режиме с подменой ip-адресов для устройств с операционной системой UNIX. Подробное описание работы программы представлено на блок-схеме на рис. 3.

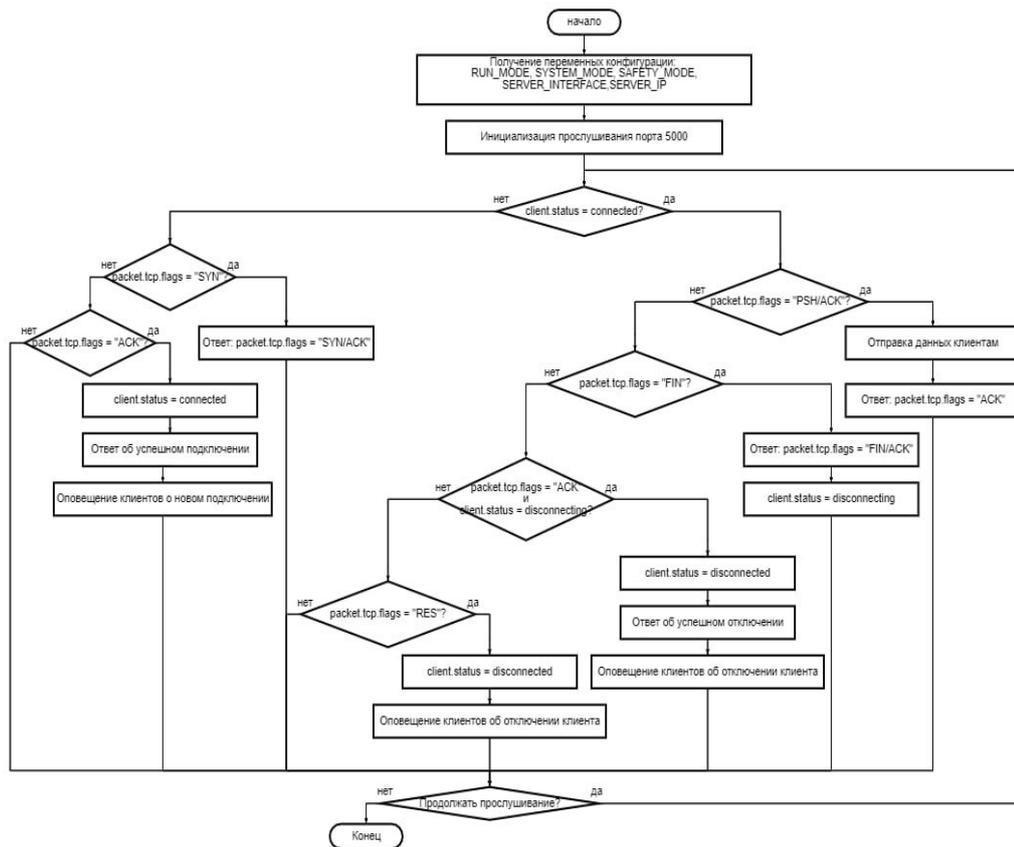


Рис. 3. Блок-схема программы
 Fig. 3. The flowchart of the program

4. С любого устройства, выступающего в роли клиента, необходимо отправить текстовые данные, которые будут пересланы остальным клиентам, подключенным в данный момент к устройству-серверу [5-7].

5. Изучить захваченный с помощью программы wireshark сетевой трафик.

После описанных шагов можно завершать работу программ server.py, client.py и wireshark.

Обсуждение результатов. В результате проведенного эксперимента было установлено, что применение метода подмены адреса отправителя существенно улучшает безопасность корпоративных сетей. Этот метод затрудняет определение конфигурации сети и обнаружение её уязвимых мест, снижая вероятность успешных атак, основанных на знании конфигурации [11-14]. Рассмотрим дампы, снятые во время проведения эксперимента с использованием подмены адресов и без нее (рис. 4 и 5).

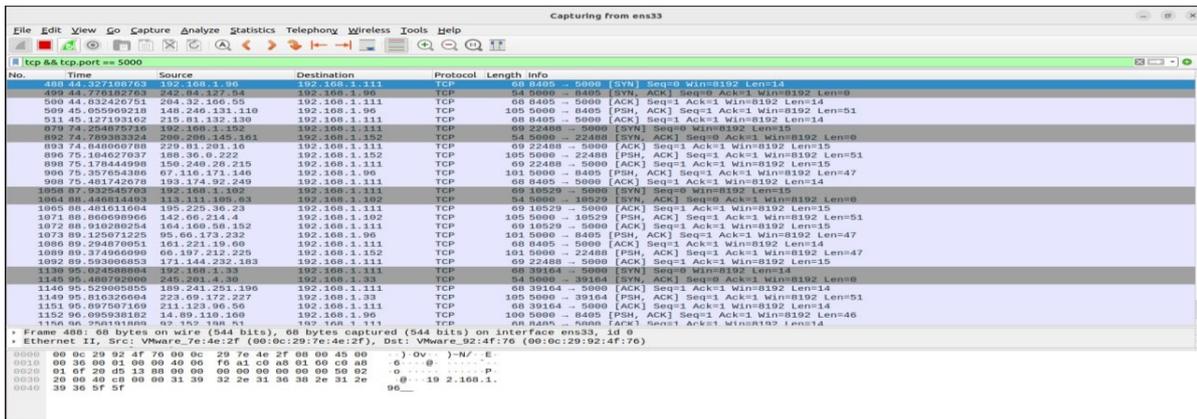


Рис. 4. Дамп Wireshark с использованием подмены адресов
 Fig. 4. Wireshark dump using address substitution



Рис. 5. Дамп Wireshark без использования подмены адресов
 Fig. 5. Wireshark dump without using address substitution

При анализе дампов из приложения Wireshark можно составить конфигурацию сети, представленную на рис. 6, в способе без использования подмены адресов. Знание конфигурации сети позволяет злоумышленникам лучше планировать и осуществлять атаки, поэтому защита этой информации является критически важной для обеспечения безопасности сетевых систем [15-17].

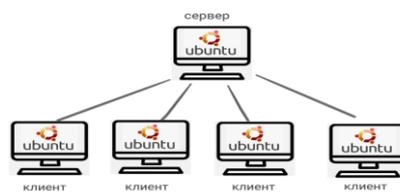


Рис. 6. Схема корпоративной сети
 Fig. 6. Corporate network diagram

Таким образом, использование данного метода способствует надежной защите корпоративных сетей от угроз, связанных с конфигурацией сети, и подтверждает необходимость внедрения инновационных подходов к обеспечению безопасности сетевых инфраструктур на основе научных принципов и технологий.

Вывод. Полученные результаты демонстрируют эффективность использования подмены адреса отправителя для повышения безопасности в корпоративных сетях. Эксперименты показали, что невозможно определить конфигурацию сети и её слабые места, что делает атаки на основе конфигурации менее вероятными. Количество пользователей постоянно растёт, и угрозы внешнего вмешательства становятся серьёзнее. Угроза несанкционированного доступа к ресурсам организации со стороны злоумышленников становится актуальной. Типичная конфигурация корпоративной сети может быть связана с соединением с Internet, что увеличивает риск внешних вторжений [18-19].

При подключении к сетям общего пользования организация сталкивается с угрозами перехвата передаваемой информации, внешних вторжений и утечек конфиденциаль-

ных данных. Безопасность корпоративных сетей можно рассматривать на нескольких уровнях информационной инфраструктуры: персонал, приложения, СУБД, ОС и сеть.

Эти результаты имеют большое значение для развития методов обеспечения безопасности в сетевых инфраструктурах. Они подтверждают необходимость применения инновационных подходов к защите корпоративных сетей от угроз, связанных с конфигурацией сети. Исследование подчёркивает значимость обеспечения безопасности в корпоративных сетях, так как они являются основой функционирования всемирной сети Internet.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке «Грант ИБ МТУ-СИ» 2022 г. № 10/22-к. Соглашение № 40469-10/2022-к от 30.06.2022.

Acknowledgments. The work was carried out with the financial support of the Grant IB MTUCI 2022 No. 10/22-k. Agreement No. 40469-10/2022-k dated 06/30/2022.

Библиографический список:

1. Верещагин К.В. Защита корпоративных сетей от DDOS-атак: современные методы и тенденции // Научный лидер. 2023. - С. 12-15.
2. Пронько А.С. Анализ методов классификации трафика в сетях // Техника и технология современных производств. Пенза: Пензенский государственный аграрный университет, 2023. - С. 348-351.
3. Киструга А.Ю., Ковцур М.М., Шарапов Р.И. Исследование подходов к анализу чипсетов WLAN с целью выявления аппаратных уязвимостей//Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2023). - Санкт-Петербург: 2023. - С. 628-631.
4. IEEE Standard for Information technology—Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks—Specific requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications,” IEEE
5. Крыщенко Н.И., Миняев А.А., Ковцур М.М. Исследование рекомендаций производителей по безопасной настройке беспроводного оборудования//В сборнике: Региональная информатика и информационная безопасность. Сборник трудов Юбилейной XVIII Санкт-Петербургской международной конференции. — Санкт-Петербург, 2022. - С. 592-596.
6. Дрепа В. Е., Киструга А. Ю., Ковцур М.М. Точность определения местоположения WI-FI клиента в свободном пространстве при использовании индикатора уровня принимаемого сигнала//В книге: Региональная информатика (РИ-2022). Юбилейная XVIII Санкт-Петербургская международная конференция. Материалы конференции. - Санкт-Петербург, 2022. - С. 549-550.
7. W. Ciezobka et al., “FTMRate: Collision-Immune Distance-based Data Rate Selection for IEEE 802.11 Networks,” 2023 IEEE 24th International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM), Boston, MA, USA, 2023, pp. 242
8. Мирсаидова Н.С. Обеспечение информационной безопасности в различных сетях//Государственное управление. Национальная академия наук Таджикистана, 2023. - С. 339-347.
9. Салимгареев К.И. Защита корпоративных данных//Стратегическое развитие инновационного потенциала отраслей, комплексов и организаций. Уфа: Уфимский университет науки и технологий, 2023. С. 361-364.
10. Ченжеев Д.А. Защита информации в корпоративных компаниях//I декабрьские корпоративные чтения «Корпоративные организации: от создания до успешной деятельности». Петрозаводск: Петрозаводский государственный университет, 2022. - С. 229-233.
11. Ткачева Е.Г., Калашников В.С. Анализ атак на WI-FI сети//Научный аспект. Москва: Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, 2024. - С. 4977-4983.
12. Бейдер Дэн. Чистый Python. Тонкости программирования для профи. - Санкт-Петербург: Питер, 2020. - 288 с.
13. Васильев А.Н. Программирование на Python в примерах и задачах. - Москва: Эксмо, 2021. - 616 с.
14. Учнинин А.С., Цветков А.Ю. Исследование основных характеристик и функциональных возможностей SIEM-систем // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2023). - СПб.: 2023. - С. 910-916.
15. Игнатъева Д.А., Пестов И.Е., Федорова Е.С., Федотовская А.Д. Анализ больших данных для обеспечения информационной безопасности//Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2023). - СПб.: 2023. - С. 567-572.
16. Петрова Т.В., Ковцур М.М., Карельский П.В., Поляничева А.В. Подходы обнаружения беспроводной точки доступа злоумышленника в локальной вычислительной сети//Региональная информатика (РИ-2022). - СПб.: 2022. - С. 572-573.
17. Дрепа В.Е., Ковцур М.М., Сахаров Д.В., Шарапов Р.И. Исследование метода обнаружения атак на TDLS: анализ уязвимостей и предлагаемые решения//Региональная информатика и информационная безопасность. Сборник трудов Санкт-Петербургской международной конференции. Санкт-Петербург, 2023. - С. 375-378.
18. Крыщенко Н.И., Миняев А.А., Ковцур М.М. Исследование рекомендаций производителей по безопасной настройке беспроводного оборудования//Региональная информатика и информационная безопасность. Сборник трудов Санкт-Петербургской международной конференции. Санкт-Петербург, 2023. - С. 592-596.
19. Махмутова Н.Ф., Киструга А.Ю., Ковцур М.М. WIPS как основа защиты беспроводной корпоративной сети // REDS: телекоммуникационные устройства и системы. Москва: 2024.- С. 56-60.
20. Балясов А.Е., Бухарин В.В., Голуб Б.В., Кирьянов А.В., Сахаров Д.В., Стародубцев Ю.И. Способ защиты канала связи вычислительной сети. Патент на изобретение RU 2490703 C1, 20.08.2013. Заявка № 2012123121/08 от 04.06.2012.

References:

1. Vereshchagin K.V. Protection of corporate networks from DDOS attacks: modern methods and trends. *Scientific leader*. 2023; 12-15. (In Russ)
2. Pronko A.S. analysis of traffic classification methods in networks. *Technique and technology of modern productions*. - Penza: Penza state agrarian university, 2023; 348-351. (In Russ)
3. Kistruga A.Yu., Kovtsur M.M., Sharapov R.I. Research of approaches to the analysis of wlan chipsets in order to identify hardware vulnerabilities. *Actual problems of infotelecommunications in science and education (APINO 2023)*. St. Petersburg: 2023; 628-631. (In Russ)
4. IEEE standard for information technology. Telecommunications and information exchange between systems local and metropolitan area networks. Specific requirements - part 11: Wireless lan medium access control (mac) and physical layer (PHY) specifications," IEEE.
5. Kryshchenko N.I., Minyaev A.A., Kovtsur M.M. A study of manufacturers' recommendations for the safe configuration of wireless equipment " In the collection: regional informatics and information security. Proceedings of the XVIII Anniversary St. Petersburg international conference. St. Petersburg, 2022; 592-596. (In Russ)
6. Drepa V. E., Kistruga A. Yu., Kovtsur M.M. Accuracy of determining the location of the wi-fi client in free space when using the received signal level indicator. In the book: regional informatics (ri-2022). Jubilee XVIII st. Petersburg international conference. Conference materials. St. Petersburg, 2022; 549-550. (In Russ)
7. W. Ciezobka et al., "Ftmrate: collision-immune distance-based data rate selection for ieee 802.11 Networks," 2023 IEEE 24th international symposium on a world of wireless, mobile and multimedia networks (WoWMoM), Boston, Ma, USA, 2023; 242
8. Mirsaidova N.S. Ensuring information security in various networks. *State administration. National academy of sciences of Tajikistan*, 2023; 339-347.
9. Salimgareev K.I. Protection of corporate data. Strategic development of innovative potential of industries, complexes and organizations. Ufa: Ufa University of Science and Technology, 2023; 361-364. (In Russ)
10. Chenzheev D.A. Information protection in corporate companies. I december corporate readings "Corporate organizations: from creation to successful activity". Petrozavodsk: Petrozavodsk State University, 2022; 229-233. (In Russ)
11. Tkacheva E.G., Kalashnikov V.S. analysis of attacks on wi-fi networks. Scientific aspect. Moscow: Bauman Moscow State Technical University, 2024; 4977-4983. (In Russ)
12. Bader Dan. Pure python. The intricacies of programming for the pros. St. Petersburg: peter, 2020; 288. (In Russ)
13. Vasilyev A.N. Python programming in examples and tasks. Moscow: EKSMO, 2021; 616. (In Russ)
14. Uchinin A.S., Tsvetkov A.Yu. Research of basic characteristics and functional capabilities of SIEM systems. *Actual problems of infotelecommunications in science and education (APINO 2023)*. St. Petersburg: 2023; 910-916. (In Russ)
15. Ignatieva D.A., Pestov I.E., Fedorova E.S., Fdotovskaya A.D. Analysis big data for information security. *Actual problems of infotelecommunications in science and education*. St. Petersburg: 2023; 567-572 (In Russ)
16. Petrova T.V., Kovtsur M.M., Karelsky P.V., Polyanchicheva A.V. Approaches to detecting an attacker's wireless access point in a local computer network. *Regional informatics (RI-2022)*. St. Petersburg: 2022; 572-573. (In Russ)
17. Drepa V.E., Kovtsur M.M., Sakharov D.V., Sharapov R.I. Investigation of the method of detecting attacks on tdl: vulnerability analysis and proposed solutions. *Regional informatics and information security proceedings of the St. Petersburg international conference*. St. Petersburg, 2023; 375-378. (In Russ)
18. Kryshchenko N.I., Minyaev A.A., Kovtsur M.M. Research of manufacturers' recommendations on safe configuration of wireless equipment. *Regional informatics and information security proceedings of the St. Petersburg international conference*. St. Petersburg, 2023; 592-596. (In Russ)
19. Makhmutova N.F., Kistruga A.Y., Kovtsur M.M. WIPS as the basis for protecting a wireless corporate network. *REDS: telecommunication devices and systems*. Moscow: 2024; 56-60. (In Russ)
20. Balyasov A.E., Bukharin V.V., Golub B.V., Kiryanov A.V., Sakharov D.V., Starodubtsev Yu.I. Method of protecting a communication channel of a computer network. Patent for invention RU 2490703 C1, 20.08.2013. Application No. 2012123121/08 dated 04.06.2012. (In Russ)

Сведения об авторах:

Махмутова Нурия Фаритовна, студент кафедры защищенных систем связи; iromup9898@gmail.com

Бирих Эрнест Владимирович, старший преподаватель кафедры защищенных систем связи; be1982@mail.ru, [ORCID.org/0000-0003-4808-9422](https://orcid.org/0000-0003-4808-9422)

Сахаров Дмитрий Владимирович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры защищенных систем связи; sguard7@mail.ru, [ORCID.org/0000-0002-6130-5321](https://orcid.org/0000-0002-6130-5321)

Кривец Андрей Сергеевич, студент кафедры защищенных систем связи; krivets_2002@mail.ru

Дегтярев Максим Алексеевич, студент кафедры защищенных систем связи; dumbusx@gmail.com

Information about the authors:

Nuria F. Makhmutova, Student, Department of Secure Communication Systems; iromup9898@gmail.com

Ernest V. Birikh, Senior Lecturer of the Department of Secure Communication Systems; be1982@mail.ru, [ORCID.org/0000-0003-4808-9422](https://orcid.org/0000-0003-4808-9422)

Dmitrii V. Sakharov, Cand. Sci. (Technical), Assoc. Prof., Assoc. Prof. of the Department of Secure Communication Systems; sguard7@mail.ru, [ORCID.org/0000-0002-6130-5321](https://orcid.org/0000-0002-6130-5321)

Maxim A. Degtyarev, Student, Department of Secure Communication Systems; dumbusx@gmail.com

Andrey S. Krivets, Student, Department of Secure Communication Systems; krivets_2002@mail.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/ Received 20.03.2024.

Одобрена после рецензирования/ Reviced 25.04.2024.

Принята в печать/ Accepted for publication 25.04.2024.

Совместное применение методов максимальной согласованности и антиробастного оценивания параметров при построении регрессионных моделей

С.И. Носков, Ю.А. Бычков

Иркутский государственный университет путей сообщения,
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является решение задачи вычисления параметров линейной регрессионной модели на основе совместного применения методов антиробастного оценивания и максимальной согласованности между реальными и вычисленными значениями зависимой переменной в непрерывной форме. **Метод.** Расчет неизвестных параметров модели производится с помощью сведения исходной задачи к задаче линейного программирования. Ее решение не должно вызывать вычислительных трудностей вследствие значительного количества разработанных эффективных программных средств. **Результат.** Сформированная задача линейного программирования обладает допустимой для реальных ситуаций размерностью. **Вывод.** Результаты решения численного примера указывают на эффективность предложенного в работе способа вычисления параметров линейной регрессионной модели на основе совместного применения методов антиробастного оценивания и максимальной согласованности. Окончательный выбор значений параметров остается за разработчиком модели.

Ключевые слова: линейная регрессия, идентификация параметров, метод наименьших модулей, метод антиробастного оценивания, метод максимальной согласованности, задача линейного программирования, альтернативность

Для цитирования: С.И. Носков, Ю.А. Бычков. Совместное применение методов максимальной согласованности и антиробастного оценивания параметров при построении регрессионных моделей. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2024;51(3):117-122. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-3-117-122

Combined application of methods of maximum consistency and anti-robust parameter estimation in the construction of regression models

S.I. Noskov, Yu.A. Bychkov

Irkutsk State Transport University,
15 Chernyshevskogo Str., Irkutsk 664074, Russia

Abstract. Objective. The purpose of the study is to solve the problem of calculating the parameters of a linear regression model based on the joint application of anti-robust estimation methods and maximum consistency between the real and calculated values of the dependent variable in continuous form. **Method.** The unknown parameters of the model are calculated by reducing the original problem to a linear programming problem. Its solution should not cause computational difficulties due to the significant number of developed effective software tools. **Result.** The generated linear programming problem has a dimension acceptable for real situations. **Conclusion.** The results of solving a numerical example indicate the effectiveness of the method proposed in the work for calculating the parameters of a linear regression model based on the joint application of anti-robust estimation methods and maximum consistency. The final choice of parameter values remains with the model developer.

Keywords: linear regression, parameter identification, least modulus methods, antirobust estimation, maximum consistency, linear programming problem, alternativeness

For citation: S.I. Noskov, Yu.A. Bychkov. Combined application of methods of maximum consistency and anti-robust parameter estimation in the construction of regression models.

Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2024;51(3):117-122.
DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-3-117-122

Введение. При построении математических моделей регрессионного типа для сложных систем любой природы исследователи часто совмещают различные методы. Так, в работе [1] констатируется, что проблема больших размерностей является одной из важнейших при разработке модели линейной регрессии.

В этой связи, например, при построении модели уровня загрязнения реки Тигр одновременно применялись методы плавного интегрирования подсчета абсолютного отклонения, а также метод FGLasso. В [2] при разработке модели рыночной стоимости акций крупной компании Baghdad Soft Drinks Company был использован метод штрафных наименьших квадратов для оценки параметров модели путем задействования различных штрафных функций, включая штрафы LASSO, SCAD, минимаксный вогнутый штраф в дополнение к штрафной функции Elastic-net. Статья [3] посвящена, в частности, построению модели параметрической регрессии для объема, диаметра и высоты деревьев, основанной на двухпараметрическом расширении экспоненциального гамма-распределения. При этом кратко описываются различные процедуры оценки, а именно метод максимального правдоподобия, оценка момента, оценка максимального произведения расстояний, обычная и взвешенная оценка наименьших квадратов и оценка Крамера-фон-Мизеса, а также проводится исследование результатов моделирования для сравнительности методов.

В [4] исследуются модели частичной регрессии, построенные с применением методов робастной оценки с вейвлет-порогом, Спикмана и методом сглаживания Надарьи-Уотсона с использованием прогнозных экспериментов с различными размерами выборки и коэффициентами засорения данных. В исследовании [5] отмечается, что модель обратной гауссовой регрессии применяется, когда переменная отклика является непрерывной, положительно асимметричной и хорошо соответствует обратному распределению Гаусса. В условиях мультиколлинеарности оценка максимального правдоподобия не является правильным выбором. Поэтому предлагается новая гребневая оценка главного компонента для такой регрессии, которая объединяет в себе методы главных компонент и обычную гребневую оценку. В работе [6] изучается географически взвешенная регрессия — это развитие теории наименьших квадратов по отношению к модели взвешенной регрессии, которая учитывает пространственные эффекты, в результате чего получается оценка параметров модели, которую можно использовать для прогнозирования местоположения объектов. В статье [7] предлагается построенная с помощью различных методов модель множественной регрессии для одновременного определения показателей преломления и температуры при использовании интерферометрического оптического датчика.

В [8] демонстрируется совместное применение методов наименьших модулей (МНМ) и нелинейных наименьших квадратов для построения нелинейных регрессий. Работа [9] посвящена прогнозированию индекса качества воздуха в городах района Цзинь-Цзинь-Цзи в Китае на основе линейной регрессионной модели панельных данных. При этом используются метод наименьших квадратов и его двухэтапный вариант, оценки квазимаксимального правдоподобия и обобщенного момента, робастная оценка с фиксированным эффектом. В [10] представлена новая структура M-квантильной регрессии, в которой все коэффициенты описываются гибкими параметрическими функциями. На основе модели изучаются условия жизни в странах Европейского Союза и в трех регионах Италии.

Постановка задачи. Рассмотрим линейное регрессионное уравнение (модель) вида:

$$y_k = \sum_{i=1}^m \alpha_i x_{ki} + \varepsilon_k, k = \overline{1, n}, \quad (1)$$

где: y – зависимая переменная,

а x_i – i -ая независимая переменные,

α_i – i -ый определяемый параметр,

ε_k – ошибки аппроксимации,
 k – номер наблюдения,
 n – число наблюдений (длина выборки).

Заметим, что настоящая работы выполнена в рамках логико-алгебраического (аппроксимационного) подхода к анализу данных (см., например, [11]), поэтому все переменные в (1) будем считать детерминированными величинами.

Линейную модель (1) можно представить в виде:

$$y_k = \hat{y}_k + \varepsilon_k, \quad k = \overline{1, n},$$

где y_k и \hat{y}_k – соответственно фактические (наблюдаемые) и расчетные (вычисленные по модели) значения зависимой переменной y .

Наиболее распространенными методами оценивания параметров модели (1) являются методы наименьших квадратов и МНМ (см., например, [12]). Существенно менее часто применяются методы антиробастного оценивания (МАО) [12] и максимальной согласованности (ММС) [13] в поведении фактических и расчетных значений зависимой переменной на предыстории исследуемого процесса.

В настоящей работе рассмотрен алгоритмический способ совместного применения МАО и ММС при оценивании линейной регрессии (1).

Методы исследования. Отличительной особенностью МАО является его выраженный антиробастный характер, что проявляется в сильной реакции на выбросы – наблюдения, плохо согласующиеся с выборкой в целом. Реализация МАО приводит к необходимости решения следующей задачи линейного программирования (ЛП):

$$\sum_{i=1}^m \alpha_i x_{ki} + u_k - v_k = y_k, \quad k = \overline{1, n}, \quad (2)$$

$$u_k + v_k - r \leq 0, \quad k = \overline{1, n}, \quad (3)$$

$$u_k \geq 0, v_k \geq 0, \quad k = \overline{1, n}, \quad (4)$$

$$r + \rho \sum_{k=1}^n (u_k + v_k) \rightarrow \min, \quad (5)$$

где ρ – наперед заданное малое положительное число.

ММС направлен на максимизацию согласованности между заданными в выборке данных $y_k, k = \overline{1, n}$ и вычисленными по модели $\hat{y}_k, k = \overline{1, n}$ значениями зависимой переменной. Формально непрерывная форма ММС состоит в решении задачи оптимизации:

$$L = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{s=k+1}^n l_{ks} \rightarrow \min, \quad (6)$$

где,

$$l_{ks} = \begin{cases} |\hat{y}_k - \hat{y}_s|, & (y_k - y_s)(\hat{y}_k - \hat{y}_s) < 0 \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Рассчитаем числа $\omega_{ks}, k = \overline{1, n-1}, s = \overline{k+1, n}$ следующим образом:

$$\omega_{ks} = \begin{cases} 1, & y_k - y_s > 0 \\ -1, & y_k - y_s < 0 \\ 0, & y_k - y_s = 0. \end{cases}$$

Тогда, как показано в [14], задача (6) сводится к задаче ЛП с ограничениями (2), (4),

$$\omega_{ks} \sum_{i=1}^m \alpha_i (x_{ki} - x_{si}) + l_{ks} \geq 0, \quad k = \overline{1, n-1}, \quad s = \overline{k+1, n}, \quad (7)$$

$$l_{ks} \geq 0, \quad k = \overline{1, n-1}, \quad s = \overline{k+1, n} \quad (8)$$

и целевой функцией

$$d \sum_{k=1}^n (u_k + v_k) + (1 - d) \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{s=k+1}^n l_{ks} \rightarrow \min. \quad (9)$$

Здесь $d \in (0, 1]$ – заранее выбранное положительное число, задающее уровень компромисса в целевой функции (9) между функцией потерь $M = \sum_{k=1}^n |\varepsilon_k| = \sum_{k=1}^n (u_k + v_k)$, соответствующей МНМ и непрерывным критерием согласованности поведения (6).

Легко видеть, что при $d = 1$ задача ЛП (2), (4), (7) – (9) реализует МНМ, а при d , близком к 0, она позволяет определить оценки параметров модели (1), обеспечивающие

максимальную согласованность поведения расчетных и фактических значений выходной переменной, как это рекомендовано в работе [14].

Обсуждение результатов. Для совместного применения МСО и непрерывной формой ММС необходимо решить задачу ЛП с ограничениями (2) - (4), (7), (8) и целевой функцией

$$sr + \delta \sum_{k=1}^n (u_k + v_k) + (1 - s) \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{s=k+1}^n l_{ks} \rightarrow \min, \quad (10)$$

где δ – наперед заданное положительное число, $s \in (0,1)$ – число, задающее уровень компромисса между MAO и ММС.

Оценивание параметров модели (1) путем решения задачи ЛП (2) - (4), (7), (8), (10) позволяет объединить достоинства MAO и непрерывной формы ММС.

Рассмотрим простой численный пример. Пусть задана выборка данных вида:

$$X = \begin{pmatrix} 4 & 6 \\ 8 & 4 \\ 3 & 7 \\ 9 & 2 \\ 7 & 8 \\ 5 & 2 \end{pmatrix}, \quad y = \begin{pmatrix} 3 \\ 6 \\ 9 \\ 8 \\ 1 \\ 7 \end{pmatrix}.$$

Построим на ее основе линейную регрессию

$$y_k = \alpha_1 x_{k1} + \alpha_2 x_{k2} + \varepsilon_k, \quad k = \overline{1,6}, \quad (11)$$

используя МНМ, MAO, ММС и предложенный выше способ, воспользовавшись специализированными программами [15, 16].

МНМ.

$$y_k = 0.913x_{k1} - 0.109x_{k2} + \varepsilon_k, \quad k = \overline{1,6},$$

$$M=15.07, \quad r=7.02.$$

MAO.

$$y_k = 0.25x_{k1} + 0.5x_{k2} + \varepsilon_k, \quad k = \overline{1,6},$$

$$M=22, \quad r=4.75.$$

Непрерывный ММС ($d=0.5$).

$$y_k = 0.469x_{k1} + 0.19x_{k2} + \varepsilon_k, \quad k = \overline{1,6},$$

$$M=19.25, \quad r=6.28, \quad L=12.375.$$

Совместное применение MAO и непрерывный ММС ($s=0.9, \delta=0.2$).

$$y_k = 0.29x_{k1} + 0.48x_{k2} + \varepsilon_k, \quad k = \overline{1,6},$$

$$M=21.52, \quad r=4.8, \quad L=15.33.$$

Анализ результатов моделирования указывает на следующее:

1. В трех из четырех случаях (кроме МНМ) коэффициенты при независимых переменных положительны.
2. Эти коэффициенты, как значения критериев адекватности, близки для MAO и рассмотренного выше способа, что можно объяснить близостью значения s к единице.
3. В любом случае, окончательный выбор значений параметров остается за разработчиком модели, который, руководствуясь своим опытом и знаниями, должен основывать свое решение на тех задачах, которые он намерен решить с ее помощью.

Вывод. В ходе проведенного исследования получены следующие результаты:

1. Поставленная задача сведена к задаче линейного программирования.
2. Сформированная задача линейного программирования допускает альтернативные решения путем задания разных значений константам, определяющим уровень значимости задействованных методов.
3. Представленный подход может быть успешно использован при комбинировании других методов моделирования при построении регрессионных конструкций.
4. Решен численный пример.

Библиографический список:

1. Mohammed Jasim Farhan, Ahmed Mahdi Salih. Using Feasible Graphical Lasso Regression Method to Estimate the Parameters of General Linear Regression Model Under High Dimensional Data with Application // *Al Kut Journal of Economics and Administrative Sciences* 2023, Volume 15, Issue 48, P. 321-331.
2. Zahraa Karim Fahd, Basem Shaliba Muslim. Estimating the parameters of the kink regression model in the presence of a high-dimensional problem with a practical application // *Al Kut Journal of Economics and Administrative Sciences* 2023, Volume 15, Issue 48, P. 533-560.
3. Kumar D., Sharma V.K. An Extension of Exponentiated Gamma Distribution: A New Regression Model with Application // *Lobachevskii Journal of Mathematics* 2022, Volume 43, Issue 9, P. 2525–2543,
4. Ekhllass Abdulameer Al-Azzawi, Leka Ali Al-Always. Robust Estimation OF The Partial Regression Model Using Wavelet Thresholding // *Journal of Economics and Administrative Sciences*, 2022 Vol. 28, No. 133, p. 97–113.
5. Akram M.N., Amin M., Lukman A.F., Afzal S. Principal component ridge type estimator for the inverse Gaussian regression model // *Journal of Statistical Computation and Simulation*, 2022, Vol. 92, Is. 10, P. 2060-2089.
6. Hasibuan D. O., Pau Teku H., Drostela Putri M. F., Setyawan Y. Dwi Bektir R. Application of Geographically Weighted Regression Method on the Human Development Index of Central Java Province // *Enthusiastic: International Journal of Applied Statistics and Data Science*, 2023, Volume 3, Issue 2, P. 189–201.
7. Guzman-Chavez A.D., Vargas-Rodrigue E. Application of a Multiple Regression Model for the Simultaneous Measurement of Refractive Index and Temperature Based on an Interferometric Optical System // *Journal of Sensors*, 2023, Volume 2023, Special Issue, Article ID 2820062, 14 pages.
8. Türksen Ö. A novel perspective for parameter estimation of seemingly unrelated nonlinear regression // *Journal of Applied Statistics*, 2021, Volume 48, Issue 13-15: Special Issue: Recent Statistical Methods for Data Analysis, Applied Economics, Business & Finance, P. 2326-2347.
9. Ji A., Wei B., Xu L. Robust estimation of panel data regression models and applications // *Communications in Statistics - Theory and Methods*, 2023, Vol. 52, No. 21, P. 7647-7659.
10. Frumento P., Salvati N. Parametric Modelling of M-Quantile Regression Coefficient Functions with Application to Small Area Estimation. *Journal of the Royal Statistical Society Series A: Statistics in Society*, 2020, Volume 183, Issue 1, Pages 229–250.
11. Айвазян С.А., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика. Основы моделирования и первичная обработка данных. –М.: Финансы и статистика, 1983. –472 с.
12. Носков С.И., Попов Е.С., Середкин С.П., Тирских В.В., Торопов В.Д. Вариантное регрессионное моделирование производства электроэнергии в Российской Федерации // *Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки.* - 2023. - Т 50. - № 1. - С. 123-129.
13. Носков С.И. Метод максимальной согласованности в регрессионном анализе // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки.* 2021. № 10. С. 380-385.
14. Носков С.И. Применение непрерывного критерия согласованности поведения при построении регрессионных моделей // *Известия ТулГУ. Технические науки.* 2021 № 6. С. 74-78.
15. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023660087 Российская Федерация. Программа реализации ассоциирования непрерывной формы метода максимальной согласованности с антиробастным оцениванием параметров при построении линейной регрессионной модели: № 2023618290: заявл. 25.04.2023: опубли. 17.05.2023 / С. И. Носков, Ю. А. Бычков; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский государственный университет путей сообщения».
16. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022681373 Российская Федерация. Программный комплекс регрессионного моделирования методом смешанного оценивания параметров с тремя альтернативными вариантами разбиения обрабатываемой выборки данных на подвыборки: № 2022680260: заявл. 28.10.2022: опубли. 14.11.2022 / С. И. Носков, К. С. Перфильева; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский государственный университет путей сообщения».

References:

1. Mohammed Jasim Farhan, Ahmed Mahdi Salih. Using Feasible Graphical Lasso Regression Method to Estimate the Parameters of General Linear Regression Model Under High Dimensional Data with Application. *Al Kut Journal of Economics and Administrative Sciences*. 2023;15(48):321-331.
2. Zahraa Karim Fahd, Basem Shaliba Muslim. Estimating the parameters of the kink regression model in the presence of a high-dimensional problem with a practical application. *Al Kut Journal of Economics and Administrative Sciences*. 2023;15(48):533-560.
3. Kumar D., Sharma V.K. An Extension of Exponentiated Gamma Distribution: A New Regression Model with Application. *Lobachevskii Journal of Mathematics*. 2022; 43(9);2525–2543.

4. Ekhlass Abdulameer Al-Azzawi, Lekaa Ali Al-Always. Robust Estimation OF The Partial Regression Model Using Wavelet Thresholding. *Journal of Economics and Administrative Sciences*, 2022;28(133): 97–113.
5. Akram M.N., Amin M., Lukman A.F., Afzal S. Principal component ridge type estimator for the inverse Gaussian regression mode. *Journal of Statistical Computation and Simulation* 2022; 92(10):2060-2089.
6. Hasibuan D. O., Pau Teku H., Drostela Putri M. F., Setyawan Y. Dwi Bekti R. Application of Geographically Weighted Regression Method on the Human Development Index of Central Java Province. *Enthusiastic: International Journal of Applied Statistics and Data Science*. 2023; 3(2):189–201.
7. Guzman-Chavez A.D., Vargas-Rodrigue E. Application of a Multiple Regression Model for the Simultaneous Measurement of Refractive Index and Temperature Based on an Interferometric Optical System. *Journal of Sensors*. 2023;2023, Special Issue: 14, Article ID 2820062.
8. Türksen Ö. A novel perspective for parameter estimation of seemingly unrelated nonlinear regression. *Journal of Applied Statistics*. 2021;48(13-15): 2326-2347. Special Issue: Recent Statistical Methods for Data Analysis, Applied Economics, Business & Finance.
9. Ji A., Wei B., Xu L. Robust estimation of panel data regression models and applications. *Communications in Statistics - Theory and Methods*. 2023; 52(21):7647-7659.
10. Frumento P., Salvati N. Parametric Modeling of M-Quantile Regression Coefficient Functions with Application to Small Area Estimation. *Journal of the Royal Statistical Society Series A: Statistics in Society*. 2020;183(1):229–250.
11. Ayvazyan S.A., Enyukov I.S., Meshalky L.D. Applied statistics. Basics of modeling and primary data processing. *M.: Finance and Statistics*. 1983;472. (In Russ)
12. Noskov S.I., Popov E.S., Serezhkin S.P., Tirskikh V.V., Toropov V.D. Variant regression modeling of electricity production in the Russian Federation. *Herald of Daghestan State Technical University. Technical sciences*. 2023; 50(1):123-129. (In Russ)
13. Noskov S.I. Method of maximum consistency in regression analysis. *News of Tula State University. Technical science*. 2021. No. 10. P. 380-385. (In Russ)
14. Noskov S.I. Application of a continuous criterion for consistency of behavior in the construction of regression models. *Izvestia of Tula State University. Technical science*. 2021; 6:74-78. (In Russ)
15. Certificate of state registration of a computer program No. 2023660087 Russian Federation. Program for implementing the association of the continuous form of the maximum consistency method with antirobust parameter estimation when constructing a linear regression model: No. 2023618290: application. 04/25/2023: publ. 05/17/2023 / S. I. Noskov, Yu. A. Bychkov; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Irkutsk State Transport University".(In Russ)
16. Certificate of state registration of a computer program No. 2022681373 Russian Federation. Software package for regression modeling using the method of mixed parameter estimation with three alternative options for dividing the processed data sample into subsamples: No. 2022680260: application. 10/28/2022: publ. 11/14/2022 / S. I. Noskov, K. S. Perfilyeva; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Irkutsk State Transport University".(In Russ)

Сведения об авторах:

Носков Сергей Иванович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры информационных технологий и защиты информации; sergey.noskov.57@mail.ru

Бычков Юрий Александрович, аспирант кафедры информационных технологий и защиты информации; nik24-11@mail.ru

Information about authors:

Sergey I. Noskov, Dr. Sci.(Eng.), Prof., Prof., Department of Information Technologies and Information Security; sergey.noskov.57@mail.ru

Yuri A. Bychkov, Graduate Student, Department of Information Technologies and Information Security; nik24-11@mail.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/ Received 19.03.2024.

Одобрена после рецензирования/ Reviced 30.04.2024.

Принята в печать/ Accepted for publication 30.04.2024.

Веб-сервис с моделью машинного обучения для мониторинга воздушного пространства

А.Д. Попов

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

Резюме. Цель. Целью исследования является разработка веб-сервиса детектирования воздушных объектов, обнаруживающего любой летящий объект, выделяя его на изображении и классифицирующий его на предмет угрозы, поскольку современные системы обнаружения воздушных объектов (ПВО) не всегда эффективно справляются с задачей обнаружения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) из-за их малых размеров, низкой высоты полета и использования материалов, малозаметных для радиолокационных станций. БПЛА, функционирующие без управления оператора, также затрудняют обнаружение по радиосигналам. Для эффективного обнаружения БПЛА предлагается использовать систему, основанную на оптическом сканировании неба вокруг охраняемых объектов. Такая система должна обладать возможностью автономной работы и включать в себя детекторы воздушных объектов, созданные на основе технологий компьютерного зрения и искусственного интеллекта (ИИ). **Метод.** Исследование и разработка веб-сервиса мониторинга воздушного пространства основаны на методах системного анализа, синтеза, дедукции. **Результат.** Спроектирована и разработана визуальная часть веб интерфейса; сформирован датасет из открытых источников для корректного обнаружения летящих объектов; разработан нейросетевой детектор для классификации летящих объектов представляющих опасность; разработан программный модуль, позволяющий проводить автоматическое обнаружение идентификационных флагов опасных воздушных объектов с последующим предоставлением отчетов в txt файлах в yolo формате (координаты нормализованы). **Вывод.** Разделение визуальной части сервиса позволит обеспечить распределенное развертывание серверной части, повышая гибкость и масштабируемость. Разработка панели управления администратора позволит эффективно контролировать работу сервиса, управлять настройками и пользователями. В результате внедрения этих улучшений, веб-сервис сможет: выполнять мониторинг неба вокруг охраняемых объектов, автоматически обнаруживая и классифицируя воздушные объекты и идентифицировать воздушные объекты по степени угрозы, предоставляя информацию для принятия необходимых мер.

Ключевые слова: БПЛА, РЛС, компьютерное зрение, веб-сервис, детектирование, архитектура, камеры, фреймворк Flask, датасет, Roboflow, искусственный интеллект, ultralytics, JupyterLab, YOLO, OpenCV, Minio

Для цитирования: А.Д. Попов. Веб-сервис с моделью машинного обучения для мониторинга воздушного пространства. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2024; 51(3):123-129. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-3-123-129

Web service with machine learning model for airspace monitoring

A.D. Popov

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

Abstract. Objective. The goal is to develop a web service for detecting aerial objects that detects a flying object, highlights it in an image and classifies it as a threat, since modern aerial object detection systems do not always cope with the task of detecting unmanned aerial

vehicles due to their small size, low flight altitude and the use of materials that are barely noticeable to radar stations. Unmanned aerial vehicles that operate without operator control make it difficult to detect by radio signals. To detect UAVs, it is proposed to use a system based on optical scanning of the sky around protected objects. The system should be capable of autonomous operation and include aerial object detectors created on the basis of computer vision and artificial intelligence technologies. **Method.** The research and development of the airspace monitoring web service are based on the methods of system analysis, synthesis, and deduction. **Result.** The visual part of the web interface has been designed and developed; a dataset has been formed from open sources for the correct detection of flying objects; a neural network detector has been developed for classifying flying objects that pose a danger; a software module has been developed that allows for the automatic detection of identification flags of dangerous air objects with subsequent provision of reports in txt files in yolo format (coordinates are normalized). **Conclusion.** Separation of the visual part of the service will allow for distributed deployment of the server part, increasing flexibility and scalability. Development of the administrator control panel will allow for effective control of the service, management of settings and users. As a result, the web service will be able to: monitor the sky around protected objects, automatically detecting and classifying air objects and identifying air objects by threat level, providing information for taking necessary measures.

Keywords: UAV, radar, computer vision, web service, detection, architecture, cameras, Flask framework, dataset, Roboflow, artificial intelligence, ultralytics, JupyterLab, YOLO, OpenCV, Minio

For citation: A.D. Popov. Web service with machine learning model for airspace monitoring. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2024; 51(3): 123-129. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-3-123-129

Введение. В настоящее время все большую актуальность получает направление обнаружения БПЛА. Стандартные средства обнаружения воздушных объектов для данной задачи подходят не всегда. Для ПВО БПЛА имеют слишком низкую видимость в связи с малой высотой полета, малым размером и материалами корпуса, малозаметными для РЛС. Радиосканеры эфира на предмет обнаружения управляющих команд для БПЛА на характерных частотах также не всегда способны обнаружить угрозу, так как существуют БПЛА, движущиеся без управления оператором [1,2].

Постановка задачи. В качестве одного из способов решения задачи обнаружения БПЛА предлагается использование оптических средств сканирования неба вокруг охраняемых объектов для визуального обнаружения БПЛА. Чтобы такая система могла работать автономно, требуется разработка детекторов воздушных объектов на базе технологий компьютерного зрения и ИИ, которые могли бы заранее обнаружить опасный объект, классифицировать его и в случае угрозы уведомить оператора для дальнейшего принятия мер по его подавлению [3,4]. Разработка веб сервиса, позволяющего проводить загрузку видеофайлов, изображений и потокового видео с камер для классификации обнаруженного детектором любого воздушного объекта, является актуальной задачей.

Методы исследования. Архитектура системы. Систему планируется использовать на различных объектах критической инфраструктуры, а также для охраны частной территории от незаконного нарушения границ частной собственности. Общая схема функционирования веб-сервиса представлена на рис. 1.

Для создания визуальной части веб-сервиса были использованы языки разметки (HTML), таблиц стилей (CSS), программирования (JS).

Функциональная часть была реализована с использованием подхода прослушивания событий (add EventListener). Возможность сохранения текущего состояния страницы обусловлена использованием local Storage, который позволяет управлять настройками подключения камеры: добавления и удаления с сохранением состояния при перезагрузке страницы.

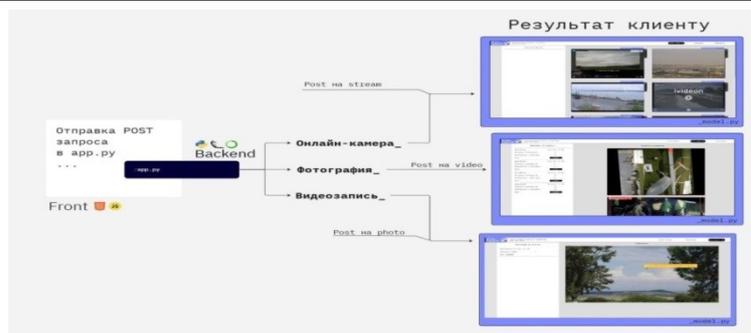


Рис. 1. Общая схема функционирования веб-сервиса
Fig. 1. General diagram of the web service functioning

Основой для серверной части веб сервиса послужил фреймворк Flask, его использование обеспечило гибкость и простоту в управлении HTTP-запросами и их обработку. Веб-сервис настроен на перехват и обработку входящих запросов от пользователей. Загруженные файлы сохранялись в специально отведенных каталогах на сервере, после чего происходил их анализ с помощью модели YOLOv8x и возвращались пользователю.

Данная модель была выбрана за ее высокую точность и быстродействие в задачах детекции объектов по сравнению с другими моделями YOLO. Модель обучена на расширенном датасете, основу которого составили размеченные изображения из открытых источников [5,6]. На начальном этапе работы системы происходит добавление видеофайлов, множества изображений и стримингового видеопотока рис. 2 - 4.

Главная страница представлена формой отображения онлайн камер, с возможностью их добавления: указания названия и ссылки для подключения рис. 2.

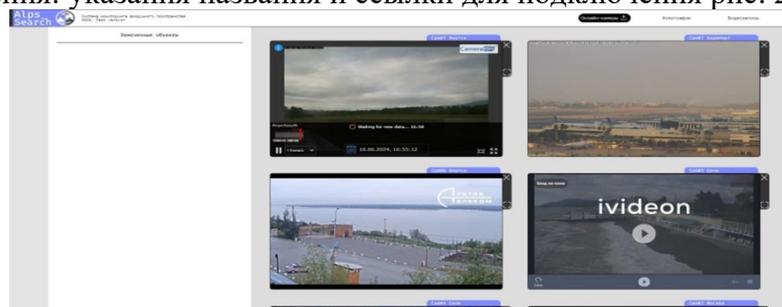


Рис. 2. Интерфейс страницы детектирования летательных объектов по стриминговому видеопотоку

Fig. 2. Interface of the page for detecting flying objects by streaming video stream

На рис. 3 представлена страница анализа изображений, особенность которой заключается в добавлении множества отдельных файлов в виде изображений.



Рис. 3. Интерфейс страницы детектирования летательных объектов по фотографиям
Fig. 3. Interface of the page for detecting flying objects from photographs

На рис. 4 представлена страница анализа видеофайлов, особенность которой заключается в полной загрузке видеофайла на серверную часть веб-сервиса для обработки нейронной сетью.

После происходит отрисовка объекта на визуальной части веб сервиса, с подсвечиванием рамкой объекта в вероятностном соотношении. В случае идентификации наиболее опасных объектов происходит сохранение видеофрагмента для последующего предоставления оператору веб сервиса.



Рис. 4. Интерфейс страницы детектирования летательных объектов по видеофайлу
Fig. 4. Interface of the page for detecting flying objects by video file

Полученный массив изображений, видеофайл и стриминговый видеопоток подается на вход нейронной сети, которая производит классификацию и отбор полученных фрагментов, представляющих наибольшую опасность. При обработке входных данных автоматически формируется отчет с идентификацией флагов обнаружения опасных воздушных объектов в txt файлах в uolo формате, с возможностью скачивания в архиве рис. 5.

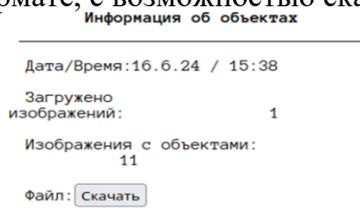


Рис. 5. Отчет с идентификацией флагов обнаружения опасных воздушных объектов
Fig. 5. Report with identification of dangerous air object detection flags

Минимальная комплектация сервера:

- операционная система: Ubuntu22.04 и выше;
- тактовая частота процессора: не менее 2 ГГц, Intel Core i5 8-го поколения или аналогичный;
- оперативная память: не менее 8 Гб;
- видеокарта: не менее NVIDIA GeForce GTX 1650 или аналоги;
- жесткий диск: не менее 30 Гб свободного дискового пространства;
- стабильная подключение к сети Интернет.

Обсуждение результатов. Описание алгоритмов, использованных при разработке веб-сервиса обнаружения БПЛА в воздушном пространстве:

1.1. Описание алгоритма автоматизированного сбора данных из открытых источников. В качестве примеров открытых источников данных используются: видеохостинг youtube, различные телеграмм каналы, сайты, СМИ, а также предоставленный набор данных.

1.2. Описание алгоритма искусственного интеллекта, позволяющего проводить автоматическую классификацию и отбор фотографий, позволяющих предупредить потенциальную угрозу в воздушном пространстве.

Для обучения искусственной нейронной сети было размечено порядка 10000 фотографий, создано 5 классов обнаружения объектов в: БПЛА самолетного типа; БПЛА коптерного типа; самолет; вертолет; птица.

Для разметки изображений и объединения их в набор данных для обучения нейросетевой модели использовалась платформа Roboflow (рис. 6), также при создании датасета были использованы фрагменты, на которых присутствовало несколько классов объектов [7]. Roboflow представляет собой платформу для разработчиков компьютерного зрения, которая позволяет улучшить сбор данных, их предварительную обработку и методы обучения моделей.

В ходе разработки алгоритма ИИ, позволяющего проводить автоматическую классификацию и обнаружение летающих объектов, представляющих потенциальную угрозу, использовалась среда разработки JupyterLab[8] с использованием библиотеки ultralytics и модулями:

1) YOLO – предоставляет функциональность для работы с моделями YOLO (You Only Look Once), популярными в задачах детекции объектов.

2) Hub – используется для взаимодействия с Ultralytics Hub, облачной платформой, предназначенной для управления, тренировки и развертывания моделей YOLO.

3) OpenCV (cv2) – это библиотека компьютерного зрения, которая предназначена для анализа, классификации и обработки изображений и др. [9].

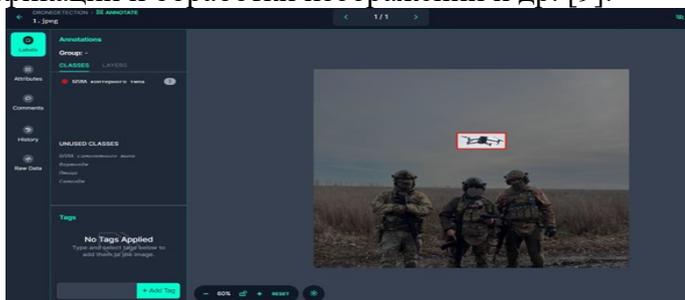


Рис.6. Процесс разметки изображений в платформе Roboflow
 Fig. 6. The process of image marking in the Roboflow platform

Обоснование использования модели искусственного интеллекта YOLOv8x [10].

Model: Версия модели YOLO. Например, YOLOv5n, YOLOv6n и т.д.

Эти версии представляют различные архитектуры и конфигурации модели YOLO, разработанные для разных целей, таких как повышение точности, снижение вычислительной сложности и т. д.

Size (pixels): Размер входного изображения, которое используется моделью для предсказания. Обычно это фиксированный размер, например, 640x640 пикселей.

mAPval (50-95): Средняя точность предсказаний (mean Average Precision) на валидационном наборе данных, измеренная по порогам IoU (Intersection over Union) от 50% до 95%. Это важный показатель качества модели, характеризующий, насколько точно модель может предсказывать объекты в изображениях.

Speed CPU (мс): Время выполнения одного предсказания на процессоре (CPU), измеренное в миллисекундах. Пустые значения могут означать, что данные не предоставлены или не измерены.

Speed T4 GPU (мс): Время выполнения одного предсказания на графическом процессоре NVIDIA T4 (GPU), измеренное в миллисекундах. Пустые значения могут означать, что данные не предоставлены или не измерены. Сравнительная таблица производительности моделей YOLO (рис. 7).

Models						
Model	size (pixels)	mAPval 50-95	Speed CPU (ms)	Speed T4 GPU (ms)	params (M)	FLOPs (B)
YOLOv5n	640	28.0	-	-	1.9	4.5
YOLOv6n	640	35.9	-	-	4.3	11.1
YOLOv8n	640	37.5	-	-	3.2	8.9
YOLOv5s	640	37.4	-	-	7.2	16.5
YOLOv6s	640	43.5	-	-	17.2	44.2
YOLOv8s	640	44.7	-	-	11.2	28.8
YOLOv5m	640	45.4	-	-	21.2	49.0
YOLOv6m	640	49.5	-	-	34.3	82.2
YOLOv8m	640	50.3	-	-	25.9	79.3
YOLOv5l	640	49.0	-	-	46.5	109.1
YOLOv6l	640	52.5	-	-	58.5	144.0
YOLOv7	640	51.2	-	-	36.9	104.7
YOLOv8l	640	52.8	-	-	43.7	165.7
YOLOv5x	640	50.7	-	-	86.7	205.7
YOLOv7-X	640	52.9	-	-	71.3	189.9
YOLOv8x	640	53.7	-	-	68.2	258.5

Рис.7. Сводная таблица характеристик моделей YOLO
 Fig. 7. Summary table of YOLO model characteristics

Params (M): Количество параметров в модели, измеренное в миллионах (M). Параметры включают веса и смещения (biases) в нейронных сетях и являются показателем сложности модели. Чем больше параметров, тем сложнее модель.

FLOPs (B): Количество операций с плавающей точкой в секунду (Floating Point Operations per Second), измеренное в миллиардах (B). Это показатель вычислительной сложности модели. Чем больше FLOPs, тем больше вычислительных ресурсов требуется для работы модели.

YOLOv8x выделяется среди других моделей благодаря самой высокой точности (mAP 53.7), что делает её идеальной для задач, требующих максимальной точности обнаружения объектов. Несмотря на большее количество параметров и FLOPs, она обеспечивает высокую вычислительную мощность и эффективность использования памяти по сравнению с другими моделями, такими как YOLOv5x и YOLOv7. Таким образом, YOLOv8x является лучшим выбором для высокоточных применений, где доступны мощные вычислительные ресурсы.

1.3. Развертывание веб-сервиса мониторинга воздушного пространства.

Развертывание веб сервиса предполагается с использованием технологии контейнеризированной Docker [11,12]. Данная технология обеспечивает лучшую изоляцию приложения, легковесность, быструю переносимость на другие системы, масштабируемостью, упрощенным подходом к управлению версиями.

В связи с ограничением размера загрузки файлов на GitHub необходимо скачать модель по адресу https://disk.yandex.ru/d/qU_n3h_2Rd8WEw.

1) Клонирование репозитория;

```
git clone https://github.com/verlliann/LCT.git
```

2) После скачивания требуется разархивировать архив;

```
unzip lct23_AlpsSearch.zip
```

3) Перенести файл drone.pt в каталог проекта по адресу ./static/python

```
mv drone.pt ./static/python
```

4) Сборка Dockerfile

```
sudo docker build -t lct_cuda05.
```

5) Развертывание контейнера

```
sudo docker run --gpus all -p 80:80 --name=lct_cuda05 lct_cuda05
```

Вывод. В качестве перспективного направления развития веб-сервиса мониторинга воздушного пространства может послужить развертывание Minio, для сохранения видеофайлов и отчетов, создание обособленной визуальной части с целью распределенного развертывания серверной части, разработка панели администрирования. Таким образом, использование веб-сервиса позволит осуществлять сканирование неба вокруг охраняемых объектов и идентифицировать воздушные объекты по степени опасности.

Исходя из поставленной цели, в ходе работы был разработан веб сервис для детектирования воздушных объектов. Он позволяет загружать видеофайлы, изображения и потоковое видео с камер, чтобы осуществить классификацию обнаруженных объектов. Данная система предназначена для использования на объектах критической инфраструктуры и охраны частной территории.

Библиографический список:

1. Беспилотные летательные аппараты: библиографический указатель /сост. О. В. Давыденко; под ред. Н. Н. Астаповой. – Кемерово: ИИО Кузбасской ГСХА, 2021. – 23 с.
2. Астахова, Н. Л. Дроны и их пилотирование. С чего начать / Н. Л. Астахова, В. А. Лукашов. - СПб.: БХВ-Петербург, 2021. – 224 с.: ил.
3. Дудкин А.А., Ганченко В.В., Инютин А.В., Марушко Е.Е. Идентификация и классификация объектов на изображениях, полученных с помощью съемочных средств БПЛА и орбитального базирования // Системный анализ и прикладная информатика. 2022. № 4. С. 30–37.
4. Бубеньщиков А.А., Кастырин М.И., Потаенков Г.О. Разработка аппаратно-программного модуля обнаружения и идентификации БПЛА с запретом его доступа в охраняемую зону на основе подмены сигналов управления//Сборник: Техника и безопасность объектов уголовно-исполнительной системы. Сб. мат. Международной научно-практической конференции. Иваново, 2022. С. 186–189.
5. Создание и развертывание моделей компьютерного зрения//URL: <https://roboflow.com/> (дата обращения 01.06.2024).
6. Струков С.А., Печенкин А.Ю., Белослудцев В.Н. Реализация принципов определения расстояния до объектов на базе искусственной нейронной сети // Сборник: Приборостроение в XXI веке – 2022.

- интеграция науки, образования и производства. Сборник материалов XVIII Всероссийской научно-технической конференции. Ижевск, 2023. С. 56–60.
7. Цурихин О.И., Сокольников В.В. Процесс создания выборки для обучения нейросети с помощью Roboflow // Информационные технологии в строительных, социальных и экономических системах. 2024. № 1–2 (31–32). С. 58–61.
 8. Ochkov V.F., Tikhonov A.I., Stevens A. Jupyter notebook, Jupyterlab-integrated environment for stem education // В сборнике: 2022 6th International Conference on Information Technologies in Engineering Education, Inforino 2022 - Proceedings. 6. 2022.
 9. Ильичев В.Ю. Применение библиотеки OpenCV языка Python для распознавания образов объектов // Системный администратор. 2021. № 7-8 (224-225). С. 130-132.
 10. Практическое применение моделей YOLO и ResNet для обнаружения нежелательных предметов на фотографиях // URL: <https://habr.com/ru/articles/761200/> (дата обращения 01.06.2024).
 11. Chae M.S., Lee H.M., Lee K. A. Performance comparison of Linux containers and virtual machines using Docker and Kvm // Cluster Computing. 2019. Т. 22. № Suppl. 1. С. 1765–1775.
 12. Захарченко В.Ф., Бизюк А.Н. Контейнеризация и развертывание приложений с помощью Docker и Docker-compose // В сборнике: Материалы докладов 56-й международной научно-технической конференции преподавателей и студентов. в двух томах. Витебск, 2023. С. 80–82.

References:

1. Unmanned aerial vehicles: bibliographic index. Compiled by O. V. Davydenko; edited by N. N. Astapova. - Kemerovo: IO Kuzbass State Agricultural Academy, 2021; 23. (In Russ)
2. Astakhova N. L., Lukashov V. A. Drones and their piloting. Where to start. St. Petersburg: BHV-Petersburg, 2021; 224l. (In Russ)
3. Dudkin A. A., Ganchenko V. V., Inyutin A. V., Marushko E. E. Identification and classification of objects in images obtained using UAV and orbital-based survey equipment. Systems analysis and applied informatics. 2022; 4.: 30–37. (In Russ)
4. Bubenshchikov A.A., Kastyrin M.I., Potaenkov G.O. Development of a hardware and software module for detecting and identifying UAVs with a ban on their access to a protected area based on the substitution of control signals. In the collection: Technology and safety of penal system facilities. collection of materials of the International scientific and practical conference. Ivanovo, 2022; 186–189. (In Russ)
5. Creation and deployment of computer vision models/<https://roboflow.com/> (date of access 01.06.2024).
6. Strukov S.A., Pechenkin A.Yu., Belosludtsev V.N. Implementation of the principles of determining the distance to objects based on an artificial neural network. In the collection: Instrument making in the 21st century – 2022. integration of science, education and production. Collection of materials of the XVIII All-Russian scientific and technical conference. Izhevsk, 2023;56–60. (In Russ)
7. Tsurikhin O.I., Sokolnikov V.V. The process of creating a sample for training a neural network using Roboflow. *Information technologies in construction, social and economic systems*. 2024;1–2(31–32):58–61. (In Russ)
8. Ochkov V.F., Tikhonov A.I., Stevens A. Jupyter notebook, Jupyterlab-integrated environment for stem education. 2022 6th International Conference on Information Technologies in Engineering Education, Inforino 2022 - Proceedings. 6. 2022.
9. Pyichev V.Yu. Application of the OpenCV library of the Python language for object pattern recognition // System administrator. 2021;7-8 (224-225):130-132. (In Russ)
10. Practical application of YOLO and ResNet models for detecting unwanted objects in photographs // URL: <https://habr.com/ru/articles/761200/> (date of access 01.06.2024) (In Russ)
11. Chae M.S., Lee H.M., Lee K. A. Performance comparison of Linux containers and virtual machines using Docker and Kvm. *Cluster Computing*. 2019; 22(1. 1):1765–1775.
12. Zakharchenko V.F., Bizyuk A.N. Containerization and deployment of applications using Docker and Docker-compose. *In the collection: Proceedings of the 56th international scientific and technical conference of teachers and students. in two volumes*. Vitebsk; 2023:80–82.

Сведения об авторе:

Попов Антон Дмитриевич, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизированных информационных систем органов внутренних дел; anton.holmes@mail.ru

Information about the author:

Anton D. Popov, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Department of automated information systems of internal organs; anton.holmes@mail.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/ Received 05.07.2024.

Одобрена после рецензирования / Reviced 30. 07.2024.

Принята в печать /Accepted for publication 30.07.2024.

Исследование методом расширенного систематического обзора литературы E-SLR проблемы обеспечения безопасности персональных данных при использовании OSINT

Н.Н. Романова¹, В.В. Грызунов²

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I,

¹190031, г. Санкт-Петербург, Московский пр-т., 9, Россия,

²Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России,

²196105, г. Санкт-Петербург, Московский пр-т., 149, Россия

Резюме. Цель. Количество персональных данных в открытых источниках увеличивается с каждым днем, что позволяет получить доступ к ним с помощью методов разведки по открытым источникам (OSINT) третьим лицам, которые могут использовать их в злонамеренных целях. Целью данной работы является идентификация угроз и существующих методов и средств обеспечения безопасности персональных данных пользователя и его репутации при использовании злоумышленниками OSINT, а также идентификация основных проблем при защите ПД пользователя с учетом OSINT. **Метод.** Для исследования используется расширенный метод систематического обзора литературы (e-SLR), представляющий систематический обзор литературы (SLR), дополненный ответами нейросетей ChatGPT, GigaCHAT, YndexGPT. **Результат.** Получен 41 источник для анализа проблемы, на основании которых определены угрозы для персональных данных: нарушение конфиденциальности персональных данных, нарушение работы информационных систем, целевые атаки с использованием социальной инженерии, раскрытие паролей, шпионаж; средства защиты: обработка данных перед публикацией, анонимизация и деперсонафикация, ограничение персональных данных, выбор сайтов, защита с помощью OSINT, создание сложных паролей, использование средств защиты, организационные меры; проблемы при разработке средств защиты: работа с большими данными, недостоверность информации и источников, трудоемкость анализа данных, технические ограничения, предвзятость, этический и юридический аспекты. **Вывод.** Полученные результаты можно использовать для разработки моделей защиты персональных данных в открытых источниках, методов и средств обнаружения и предотвращения нарушения их защищенности.

Ключевые слова: OSINT, систематический обзор литературы, информационная безопасность, персональные данные, искусственный интеллект, методы защиты информации

Для цитирования: Н.Н. Романова, В.В. Грызунов. Исследование методом расширенного систематического обзора литературы E-SLR проблемы обеспечения безопасности персональных данных при использовании OSINT. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2024;51(3):130-144. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-3-130-144

Research by the method of an extended systematical literature review E-SLR the problem of ensuring the security of personal data when using OSINT

N.N. Romanova¹, V.V. Gryzunov²

¹Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University,

¹9 Moskovsky Ave., Saint Petersburg 190031, Russia,

²Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia,

²149 Moskovsky Ave., Saint Petersburg 196105, Russia

Abstract. Objective. The amount of personal data in open sources increases, which makes it possible for third parties to access it using open source intelligence (OSINT) methods, which can be used for malicious purposes. The aim of the work is to identify threats and existing

methods and means of ensuring the security of a user's personal data and his reputation when using OSINT by intruders, as well as to identify the main problems in protecting user PD taking into account OSINT. **Method.** The study uses an extended method of systematic literature review (e-SLR), which is a systematic literature review (SLR) supplemented by responses from ChatGPT, GigaCHAT, YndexGPT neural networks. **Result.** 41 sources were received for the analysis of the problem, on the basis of which threats to personal data were identified: violation of the confidentiality of personal data and the operation of information systems, targeted attacks using social engineering, password disclosure, espionage; protection tools: data processing before publication, anonymization and depersonalization, limitation of personal data, selection of sites, protection using OSINT, creation of complex passwords, use of protection tools, organizational measures; problems in the development of protection tools: working with big data, unreliability of information and sources, labor-intensiveness of data analysis, technical limitations, bias, ethical and legal aspects. **Conclusion.** The results were used to develop models for protecting personal data in open sources, methods and means for detecting and preventing violations of their security.

Keywords: OSINT, systematic literature review, information security, personal data, artificial intelligence, information security methods

For citation: N.N. Romanova, V.V. Gryzunov. Research by the method of an extended systematical literature review E-SLR the problem of ensuring the security of personal data when using OSINT. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2024; 51(3):130-144. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-3-130-144

Введение. С каждым днем в сети Интернет появляется все большее количество данных, к которым относятся и персональные. Это происходит по разным причинам: размещение данных пользователем самостоятельно или в результате применения злоумышленником методов социальной инженерии [1], в ходе интеграции информационных систем [2], нарушение правил безопасной разработки приложений [3] и т.п.

Разрозненные персональные данные собираются в единую картину злоумышленниками [4] посредством разведки по открытым источникам (OSINT) [5]. Наиболее ценные для злоумышленника источники – разнообразные места публичного общения: чаты, форумы, социальные сети и мессенджеры.

Применение OSINT к открытым геоинформационным системам может представлять отдельную угрозу, потому что позволяет установить местоположение объекта разведки в реальном мире [6]. OSINT часто используется ввиду своих преимуществ [7]: сбор данных осуществляется быстро и в режиме реального времени, получение данных легально и безопасно для разведчика, данный способ прост в использовании, а благодаря существующему программному обеспечению (ПО) еще и удобен, процесс разведки бесплатен или стоит недорого.

При этом классические методы обеспечения информационной безопасности практически бессильны против OSINT, так как находятся за пределами модели нарушителя, на основе которой действуют средства защиты информации [8]. В руках злоумышленника OSINT представляет следующие угрозы: осуществление целевых атак (фишинг, атаки с использованием социальной инженерии), шантаж/вымогательство на основе полученных данных, мошенничество с использованием полученных персональных данных, кража личности, нарушение конфиденциальности (раскрытие/продажа данных третьим лицам).

Постановка задачи. Исследование проблемы обеспечения безопасности персональных данных при использовании злоумышленниками OSINT является актуальным.

Целью данной работы является идентификация угроз и существующих методов и средств обеспечения безопасности персональных данных пользователя и его репутации при использовании злоумышленниками OSINT, а также идентификация основных проблем при защите ПД пользователя с учетом OSINT.

Методы исследования. Метод систематического обзора литературы является видом научного исследования, в котором объектом изучения служат результаты ряда оригинальных исследований [9].

При использовании данного метода уменьшается возможность появления систематических и случайных ошибок за счет переработки и обобщения результатов этих исследований. Метод систематического обзора литературы включает этапы исследования:

1. **Постановка исследовательского вопроса.** Необходимо определить цель и объем исследования, в соответствии с которыми будут сформированы границы исследования и основные исследовательские вопросы. Для изучения проблемы обеспечения безопасности персональных данных (ПД) при использовании злоумышленниками OSINT была поставлена цель: идентификация угроз и существующих методов и средств обеспечения безопасности персональных данных пользователя и его репутации при использовании злоумышленниками OSINT, идентификация основных проблем при защите ПД пользователя с учетом OSINT.

В соответствии с целью сформулированы исследовательские вопросы:

- Какие существуют угрозы для безопасности ПД пользователя и его репутации при использовании злоумышленниками OSINT?
 - Какие существуют методы и средства обеспечения безопасности ПД противодействующие OSINT?
 - Какие возникают проблемы при разработке методов и средств защиты ПД, противодействующих OSINT?
2. **Процесс поиска источников.** На данном этапе определяется основная стратегия поиска, состоящая из следующих шагов:

2.1. Определение цифровых библиотек. Необходимо определить критерии, которым должны соответствовать библиотеки для поиска источников, и конкретные базы данных, соответствующие критериям. Были определены следующие критерии для подбора цифровых библиотек для поиска: содержит материалы русских авторов; содержит материалы зарубежных авторов; обновляемые; содержит материалы на тему «информационная безопасность».

Для поиска были выбраны две системы: eLIBRARY и Google Scholar, потому что они способны проводить поиск по заданному фильтру и индексируют статьи журналов из перечня ВАК и международной базы данных SCOPUS.

2.2. Формирование поисковых запросов. Определяются поисковые запросы для каждого исследовательского вопроса. Для составления запросов можно использовать ключевые слова, синонимы, логические связи.

Для проводимого исследования были определены следующие поисковые запросы:

- (персональные данные | репутация) & (угрозы | уязвимости | риски) & OSINT;
- (средства защиты | методы защиты | способы защиты) & (персональные данные | репутация) & (против | противодействующих) & OSINT;
- (проблемы | риски | трудности) & (разработка | создание | проектирование) & (средства защиты | методы защиты | меры защиты | способы защиты) & (против | противодействующих) & OSINT.

2.3. Промежуточный поиск. На данном этапе производится непосредственный поиск по библиотекам, определенным на шаге 2.1, по запросам, определенным на шаге 2.2. На данном этапе были получены количественные результаты (табл.1).

3.Отбор на основании критериев включения и исключения. Необходимо сформулировать критерии, на основании которых будет получено однозначное решение включения или исключения для каждого источника, полученного на предыдущем шаге. Отбор проводится в два этапа: первый – по названиям, ключевым словам, году издания и другим свойствам источника, второй – изучение аннотаций и полных текстов.

Таблица 1. Результаты поисковых запросов

Table 1. Search query results

№ поискового запроса Search query number	Количество найденных исследований в eLIBRARY Number of studies found in eLIBRARY	Количество найденных исследований в Google Scholar Number of studies found in Google Scholar
ПЗ1	136	184
ПЗ2	196	315
ПЗ3	79	445
Итого	1355	

Для отбора публикаций были определены следующие критерии исключения и включения:

3.1. Первый этап отбора – отбор по названиям, ключевым словам:

- Исключаются обзоры литературы. В исследование попадают только собственные исследования авторов, которые включают новые подтвержденные данные.
- Исключаются статьи, которые опубликованы в ненаучных журналах или подготовлены для семинара. В исследование попадают статьи научных журналов и конференций.
- Исключаются статьи, написанные до 2020 года.
- Исключаются статьи, которые описывают не техническую составляющую процесса.

3.2. Второй этап отбора – отбор по аннотациям, полным текстам:

- (Включение) В исследовании рассматриваются угрозы безопасности ПД, возникающие при использовании злоумышленниками OSINT.
- (Включение) В исследовании рассматриваются способы защиты ПД от OSINT.
- (Включение) В исследовании рассматриваются проблемы, возникающие при защите ПД против OSINT.

После отбора было получено 93 результата (табл.2).

Таблица 2. Результаты поисковых запросов после отбора

Table 2. Results of search queries after selection

№ поискового запроса Search query number	Количество найденных исследований в eLIBRARY Number of studies found in eLIBRARY	Количество найденных исследований в Google Scholar Number of studies found in Google Scholar
Первый этап отбора		
ПЗ1	16	55
ПЗ2	7	143
ПЗ3	7	185
Итого	413	
Без дубликатов	228	
Второй этап отбора		
Итого	93	

4. Отбор на основании оценки качества. На данном этапе формулируются вопросы для оценки качества каждого оставшегося источника. Для ответов на вопросы устанавливаются числовые коэффициенты: «Да» = 1, «Частично» = 0.5, «Нет» = 0. Коэффициенты ответа на каждый вопрос суммируются и дают оценку качества источника. Исследователь должен определить какая минимальная оценка приемлема для включения источника в исследование и отбросить все источники, имеющих меньшую оценку. Для оценки качества были сформулированы следующие вопросы:

1. Ясно ли сформулированы цели и задачи исследования?
2. Сравнивается ли исследование со связанными работами?
3. Имеют ли выводы четкое изложение и теоретическую поддержку?
4. Описываются ли возможности будущего применения полученных данных?
5. Учтены ли ограничения исследования?
6. Журнал публикации статьи входит в перечень ВАК?
7. Журнал публикации статьи входит в перечень Scopus?

Для каждого вопроса, кроме 6, предусмотрены три варианта ответа и числовые коэффициенты: «Да» = 1, «Частично» = 0.5, «Нет» = 0. После ответа на все вопросы для каждого результата была получена количественная оценка качества. 52 исследования, получившие оценку 3 и меньше были отброшены. Для дальнейшего анализа взят 41 источник.

5. Сбор и анализ данных. Все результаты отбора заносились в электронную таблицу Excel. В ней сохранялись полные ссылки источников для последующего цитирования, также отдельно были вынесены тип публикации, год, вопросы оценки качества и конечная оценка качества каждого источника. Краткое описание систематического обзора литературы с полученными результатами представлено на (рис. 1).

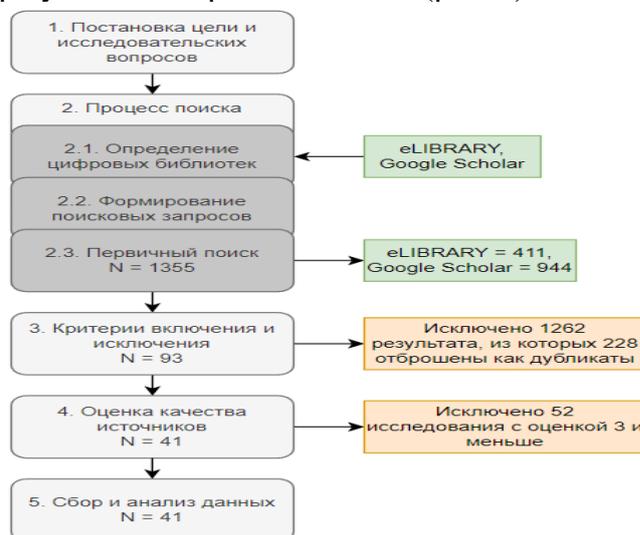


Рис. 1. Процесс систематического обзора литературы

Fig. 1. The systematic literature review process

Обсуждение результатов. Какие существуют угрозы для безопасности персональных данных (ПД) пользователя и его репутации при использовании злоумышленниками OSINT?

1. Нарушение конфиденциальности персональных данных

С помощью OSINT злоумышленник может получить незаконный доступ к персональным данным пользователей открытых источников, таких как, социальные сети, форумы, веб-приложения [10, 11]. Важный этап OSINT - анализ полученных персональных данных [7], поскольку, например, отдельный номер телефона или адрес электронной почты не определяет пользователя однозначно, следовательно, необходимо выстроить связи между разрозненными ПД для получения целого “портрета” пользователя. Собранные персональные данные могут быть выложены на специализированные сайты бесплатно для предоставления большему кругу людей и дальнейшего незаконного использования, а также могут быть проданы в виде подробных баз персональных данных [12].

Проведение разведки по открытым источникам может иметь личный характер и осуществляться в целях мести [10, 13], шантажа, вымогательства, нанесения ущерба репутации [5], а также может привести к киберзапугиванию, киберсплетням или киберагрессии [14]. Одно из преимуществ OSINT для злоумышленника - простота [7, 15]. С развитием технологий получить персональные данные легко даже для обычного пользователя компьютера, например, через telegram-каналы или боты можно получить персональные данные интересующего человека за небольшую плату [16]. Более продвинутый пользователь сети Интернет может обратиться к открытым данным государственных органов, например, налоговой или судебных приставов, и получить персональные данные жертвы [17], в качестве источников данных могут быть использованы также электронные копии сайтов из веб-архивов; страницы, кэшированные поисковыми системами; новостные порталы [18]. Существуют специальные инструменты, которые позволяют упростить и ускорить поиск персональных данных [19], например, операторы расширенного поиска Google или

Yandex, расширения для браузеров (Fast Advanced Google Search, OSINT.support, EXIF Viewer Pro и др.).

2. **Нарушение работы информационных систем.** Злоумышленники перед атакой проверяют целевой информационный ресурс различными способами, в том числе и с помощью OSINT [20]. Используя разведку по открытым источникам можно обнаружить слабые места в системе защиты потенциальной жертвы [5, 10, 13, 18], а также другую полезные данные, например, блок используемых IP-адресов, данные программного и аппаратного обеспечения, конфигурацию хостов, топологию сети, физическое местонахождение, структуру управления организации, персональные данные сотрудников и др. На основании этих данных можно определить конкретную уязвимость и совершить более успешную атаку [20 - 23]. Для сканирования информационных ресурсов с помощью OSINT используются бесплатные приложения, например, Maltego, The Harvester, Mosint.

3. **Целевые атаки с использованием социальной инженерии.** На основе полученных данных из разведки по открытым источникам злоумышленники определяют цель атаки, её интересы, наиболее уязвимые места [10, 13], на основании которых определяют более подходящие и эффективные методы воздействия [24]. Один из популярных видов подобных атак - целевой фишинг [25 - 27] для осуществления, которого сначала проводится разведка по открытым источникам для получения контекстной информации о жертвах, например, об их хобби, семье, работе или отпуске, которая потом может быть использована для создания сценария атаки [28].

4. **Раскрытие паролей пользователей.** В результате OSINT могут быть получены сведения о жизни жертвы, которые можно использовать для подбора пароля к устройствам, аккаунтам социальных сетей и др [29]. В исследованиях [25, 29] рассматривается процесс создания пользователями паролей, особенно, повторение паролей для разных сайтов и использование личных данных для создания лучше запоминающихся паролей. Данная проблема приводит к утечке персональных данных, финансовым потерям или даже краже личности [7], например, социальная кража личности – получив персональные данные жертвы злоумышленники создают поддельный идентичный профиль в социальных сетях, через который выдавая себя за жертву, общаются с ее коллегами, родственниками, друзьями для получения денежной выгоды, распространения ложной информации; финансовая кража – имея персональные данные пользователя можно получить доступ к банковскому счету, кредитным картам и другим финансовым источникам жертвы для получения финансовой выгоды. Часть пользователей создают мнемонические пароли на фразах, которые можно найти в Интернете, что создает проблемы, связанные с надежностью создаваемого пароля, особенно если такой мнемонический словарь включен в инструменты взлома паролей [29]. Пароль подбирается на основании сферы интересов жертвы, выявленных с помощью OSINT [30].

5. **Шпионаж.** Данный тип разведки может осуществляться как вручную, так и с помощью автоматизированных средств. К средствам слежки можно отнести: сервисы слежки и сбора данных (Maltego, Babel X, PhoneInfoga, TinEye, Sleeping Time) с сотни тысяч веб-сайтов, блогов и аккаунтов, которые позволяют строить графы коммуникации между людьми, анализируя и прогнозируя информационно-сетевые события; внедрение в устройства эксплойты, вирусы, руткиты, трояны, использующие уязвимости программной среды; программы-шпионы и программные закладки; перехват и анализ интернет-трафика и другие [31].

Какие существуют методы и средства обеспечения безопасности ПД, противодействующие OSINT?

1. **Обработка данных перед публикацией в сети.** Для противодействия методам OSINT рекомендуется обрабатывать данные перед выставлением в общий доступ: из файлов фото и видео удалять метаданные (данные геолокации, дата, время и др.), для усложнения сопоставления личных цифровых данных применять обфускацию (маскировка/подмена данных подмешиванием отвлекающих или вводящих в заблуждение дан-

ных в профиль), синтез данных (так, фото с «зашумлением» усложняет задачу машинного распознавания и поиска по соцсетям)) [31].

2. **Анонимизация и деперсонафикация.** В исследовании [17] рассматривается организационно-технический протокол анонимизации наборов данных для их публикации в открытых источниках, протокол обеспечивает итерационную процедуру полной анонимизации в зависимости от уровня конфиденциальности обрабатываемых данных. К методам анонимизации относятся: маскировка данных (замена чувствительных данных вымышленными или частично вымышленными данными, что делает невозможной идентификацию исходных данных), токенизация (замена чувствительных данных токеном или нечувствительным значением, уникальным для исходных данных), агрегирование данных (объединение или группировка данных вместе для сокрытия индивидуальных значений или идентификационных данных).

3. **Ограничение выставляемых данных.** Один из методов защиты от OSINT - правильно дозировать персональные данные выставляемые в своих социальных сетях, но данная ответственность лежит на самом пользователе, ведь только он решает, нужно ли совершенно различным людям знать, где вы живете, в какое время уходить на работу и т.д [32]. Для распространения данных, которые потом могут быть использованы для атаки, рекомендуется использовать личные сообщения, зашифрованные чаты. Также для защиты от опознавания по лицу алгоритмами искусственного интеллекта (ИИ) рекомендуется выставлять фото со спины, с боку, с недостаточным освещением и другими способами, позволяющими затруднить распознавание лица.

4. **Выбор сайтов, которым передавать свои персональные данные.** В наше время почти каждый сайт требует пройти процедуру регистрации для получения данных, однако большая часть требует еще и дополнительные данные кроме логина и пароля, например, ФИО, дата рождения, почта, номер телефона и др., а сайты предоставляющие услуги купли-продажи получают еще и банковские данные пользователя. В данном случае необходимо понимать куда мы предоставляем наши персональные и насколько этому сайту/приложению можно их доверить, ведь именно с незащищенных и ненадежных ресурсов происходят утечки данных или они сами их продают для получения прибыли [32]. Перед тем, как выкладывать свои персональные данные на сайт, рекомендуется ознакомиться с его политикой конфиденциальности. Если ваши данные были размещены на сайте без вашего согласия, то можно запросить их удаление через электронную почту модерации сайта.

5. **Использование OSINT против OSINT.** Огромное количество данных, получаемых посредством OSINT, позволяет специалистам по информационной безопасности узнать о тенденциях в области уязвимостей и расстановки сил в хакерских группировках, что позволяет предотвратить киберпреступления [33]. Идея проведения анализа защищенности этими методами все больше накладывается на существующие рекомендации регуляторов, так как большая их часть связана с анализом открытых источников и внешних ресурсов организации [18]. Проводя разведку по открытым источникам, специалист может выявить наличие доступных уязвимостей сети своей организации [21]. На основании собранных данных можно проводить оценку риска для безопасности организации и принимать решения о дальнейших действиях [25]. Правоохранительные органы также используют OSINT, чтобы выявить преступные намерения на ранней стадии и оперативно обнаружить противоправные действия [14]. OSINT используют в целях расследования преступлений и инцидентов информационной безопасности [34], установления виновности в кибератаках, для сбора данных о киберугрозах [35, 36]. К основным потребителям данных из открытых источников являются платформы анализа угроз (TIP).

Например, ThreatQ, Threatstream, EclecticlQ, которые помогают организациям объединять, сопоставлять и анализировать данные об угрозах из нескольких источников в режиме реального времени для поддержки защитных действий [37]. В исследовании рассматривается процесс интеграции между методами OSINT и стандартом ISO 27001 для

дополнительной безопасности [38]. В исследовании [23] выявлены особенности обеспечения информационной безопасности организации с помощью средств OSINT, которые можно использовать в разработке тактических и стратегических рекомендаций организациям по формированию более надежных политик информационной безопасности, выявлению уязвимостей и снижению рисков. В исследовании [39] разработана концепция OSINT, для его использования в мониторинге безопасности. Использование OSINT позволяет специалистам по информационной безопасности получить более глубокое представление о APT-группировках: обнаружить вредоносные домены и IP-адреса, которыми пользуются APT-группировки, отследить упоминания участников угроз и их цели [40]. Использование OSINT является важной частью анализа угроз, включая тестирование на проникновение и реагирование на инциденты. Данные, полученные в результате интернет-разведки OSINT, о злоумышленнике и совершенном им преступлении, является важным фактором для успешного расследования. Она помогает выдвинуть версию, выбрать правильные тактические приемы при проведении следственных действий, спланировать и организовать подготовку к проведению тактических операций и правильно выстроить алгоритм действий на разных этапах расследования уголовного дела [41].

6. Создание сложных паролей и ограничение попыток неправильного набора. В исследовании [29] предлагаются методы усиления паролей, самые простые из которых, являются негибкие правила в отношении длины пароля и типа используемых символов, а также определенный допуск к количеству раз, когда учетные данные могут быть введены неправильно. В исследовании [21] также предлагается ограничивать количество попыток ввода пароля, а также использовать двухфакторную аутентификацию для входа в аккаунт. В исследовании [42] описывается новый метод оценки паролей, который использует учетные записи человека в социальных сетях для повышения точности оценки пароля путем создания собственных списков слов, сравнения пароля со словами, найденными в социальных сетях человека, и поиска в большой базе данных утекших или взломанных паролей.

7. Использование средств защиты информации. Для организаций рекомендуется использовать системы обнаружения/предотвращения вторжений и межсетевые экраны [16] для сканирования сети и обнаружения подозрительного трафика, также предлагается установить обманную систему для изучения и фиксации интереса злоумышленника к организации [21]. Также советуется подключать двухфакторную аутентификацию для защиты в случае компрометации паролей, а выход в сеть осуществлять посредством VPN [16], для обеспечения анонимного выхода в сеть и сокрытия своего местоположения, поведения в сети. Для защиты сервера предлагается использовать SSH-ключ вместо пароля, а также настроить резервное копирование для восстановления данных в случае потери или изменения. Для соединения с сервером по сети Интернет рекомендуется использовать протокол TLS для криптографически безопасного соединения. Он дает возможность клиентам проводить проверку подлинности серверов и наоборот.

8. Организационные меры. Необходимо проводить регулярное обучение сотрудников распознаванию методов социальной инженерии и фишинга, а также оповещать их о новых видах атак, также необходимо уведомлять сотрудников о необходимости фильтрации контента, размещенного ими и имеющего непосредственное отношение к трудовой деятельности [21]. Если у пользователей есть знания по аспектам безопасности в киберпространстве, то количество персональных данных полученных с помощью OSINT может быть значительно меньше, чем у беспечных пользователей. Должны быть четко прописаны обязанности каждого сотрудника, доступные ему данные, границы их распространения, также по возможности обработка персональных данных должна производиться на рабочих, а не личных устройствах [11].

Какие возникают проблемы при разработке методов и средств защиты ПД, противодействующих OSINT?

1. **Работа с Big Data.** Количество персональных данных, получаемых посредством OSINT, может достигать огромных размеров, а сам процесс сбора представляет сложную по времени задачу [7, 33, 43]. Применение средств автоматизации не решает полностью проблему обработки больших данных [44]. Значительных ресурсов требует фильтрация и анализ полученных данных [14], что ставит перед специалистами по информационной безопасности задачу по усовершенствованию существующих и разработке новых более эффективных методов обработки данных, нахождения связей между ними и интерпретации полученных результатов.

2. **Недостоверность информации и ненадежность источников.** Зачастую данные, размещенные в открытых источниках недостоверны или субъективны [45]. Из всего набора данных, полученного посредством OSINT, сложнее вывести достоверные данные, а для обнаружения ложной информации и отбора достоверных данных требуется много времени и усилий [7, 33, 43], что, с одной стороны, осложняет злоумышленнику подготовку к атаке, а с другой, мешает специалистам по защите устанавливать необходимость их защиты, приводит к ложным выводам [35]. Субъективные и ложные данные позволяют создать информационный «шум» в ПД, который может снизить вероятность успешности атаки или увеличить усилия и затраты атакующего, что сделает атаку не выгодной. На данный момент нет инструментов зашумления персональных данных для публикации в открытых источниках, что является еще одной задачей для специалистов по защите. Также для изучения остаются вопросы: как именно и в каких случаях следует применять данный метод? При работе с персональными данными необходимо проводить проверку надежности источников, поскольку выбор ресурса также может привести к ошибочным выводам и неправильным результатам [43]. К наиболее субъективным и требующим дополнительной проверки относятся онлайн СМИ и социальные сети [14]. Сложность в разработке мер и средств защиты персональных данных также определяется затратами ресурсов на выявление относительно небольшой подгруппы ценных источников из всего множества открытых ресурсов [20].

3. **Трудоемкость анализа данных.** Полученный, в результате разведки по открытым источникам, объем данных необходимо проанализировать, отфильтровать, классифицировать, сравнить с секретными, что требует квалифицированных кадров и времени [43]. Кроме того, важен корректный учет формализованных связей между данными, содержащимися в публикуемом пользователем контенте, и результатами, полученными с помощью разработанных инструментов оценки ряда идентификационных параметров личности нарушителя [13], такие как идентификатор страницы в социальных сетях, персональные данные со страницы, список друзей и подписок и др. Отдельную ценность имеют информация о процессе обработки данных, сохраненные массивы еще необработанных данных, отчеты и сводки для последующего использования, что облегчает поиск и позволяет сократить использование ресурсов при повторном использовании данных [46].

По мере увеличения количества источников и типов приложений объем данных OSINT растет в геометрической прогрессии, что требует новых аналитических методов для получения значимой информации [47]. Искусственный интеллект является одним из способов решения этой задачи [14, 37]. Инструменты искусственного интеллекта, машинного обучения и автоматизации способны сканировать огромные объемы данных и коммуникаций, умело выявляя связи и риски, требующие дальнейшего изучения [14]. Анализ полученных данных необходим для установки закономерностей между разрозненными персональными данными для разработки методов защиты.

4. **Технические ограничения.** При разработке средств защиты необходимо решать проблемы, связанные со спецификой совместного использования программно-аппаратных средств: расширений веб-браузера, ограничений, накладываемых разработчи-

ками и других [13]. Некоторые данные, получаемые в ходе разведки по открытым источникам, могут быть представлены в нечитаемом или сложно читаемом видах, что существенно снижает возможность дальнейшей работы с ними [45].

5. **Неоцененность технологии.** В организационной культуре разведывательных агентств ценность данных, собранных OSINT, недооценивается, а важность данных иногда не учитывается, поскольку любой может получить к ним доступ и использовать их [33].

6. **Этический и юридический аспект.** С увеличением возможностей OSINT появляются вопросы относительно обеспечения защиты интересов граждан и надлежащего уровня защиты персональных данных. Согласно ФЗ №152 «О персональных данных», собирать, обрабатывать и хранить ПД людей можно только с их согласия. Однако, многие сайты, в том числе социальные сети, принимают за согласие факт регистрации пользователя или само использование ресурса, что приводит к выбору - либо передавать свои ПД, либо не пользоваться ресурсом [35].

Обсуждение результатов. OSINT общедоступен и имеет право раскрывать данные, которые размещены неявно [14], однако к ним могут относиться ПД из специальной категории, например, расовая, национальная принадлежность, политические взгляды, религиозные или философские убеждения, состояние здоровья, интимной жизни, что не допускается без прямого согласия пользователя. Основная сложность состоит в том, что эти данные можно получить путем анализа открытых данных пользователя - фото, посты, список друзей и др. На данный момент отсутствуют единые стандарты открытости информации, подходов к использованию таких данных и инструментов их обработки [34, 45, 48]. Авторами предложено расширение метода SLR с применением искусственного интеллекта. Используемый классический метод SLR базируется на квалификации эксперта и, значит, несёт в себе признаки субъективного подхода. Данный недостаток нейтрализуется путём применения для задач поиска искусственного интеллекта. Расширенный таким образом метод SLR предлагается назвать e-SLR.

Суть расширения в том, что п.2.2 метода SLR дополняется ответами нейросетей.

В исследовании использованы 3 нейросети:

1. **ChatGPT** (англ. Generative Pre-trained Transformer «генеративный предварительно обученный трансформер»). Данная нейросеть представляет собой большую языковую модель, представленную американской компанией OpenAI 30 ноября 2022г. Функциональные возможности: ответы на вопросы пользователей, поиск информации (подобно поисковым системам), написание кода, перевод текста, пересказ и перефразирование текста, распознавание и генерация голоса, распознавание изображений. Сервис заблокирован в России на момент написания статьи. Доступ возможен через VPN и иностранные номера телефонов, чат-ботов посредников.

2. **YandexGPT** – нейросеть, выпущенная компанией Яндекс в мае 2023. Работает по аналогии с языковой моделью GPT компании Open AI. Функциональные возможности: ответы на вопросы, генерация текста, генерация изображений по текстовому описанию, написание простого кода, пересказ, форматирование текста.

3. **GigaCHAT.** Данная нейросеть выпущена Сбером в апреле 2023. Нейросеть основана на ансамбле NeONKA (NEural Omnimodal Network with Knowledge-Awareness), включающей в себя модели ruGPT-3.5 с 13 млрд параметров, Kandinsky 2.1, ruCLIP и FRED-T5. Функциональные возможности: ответы на вопросы, генерация текста, генерация изображений по текстовому описанию, перевод, написание простого кода, анализ данных. В результате опроса нейросетей были получены следующие дополнительные данные, отвечающие на исследовательские вопросы:

1. Какие существуют угрозы для безопасности персональных данных (ПД) пользователя и его репутации при использовании злоумышленниками OSINT? Ответы соответствуют данным, полученным в результате анализа литературы, представленных в п. Результаты систематического обзора литературы.

2. Какие существуют методы и средства обеспечения безопасности ПД противодействующие OSINT?

Прокси-серверы и серверы аутентификации. Они обеспечивают дополнительный уровень безопасности, скрывая IP-адрес пользователя и проверяя подлинность его учетных данных [GigaCHAT].

Настройка приватности. Ограничение физического и логического доступа к персональным данным помогает предотвратить утечку и неправомерное использование информации [YandexGPT]. Проверьте и регулярно обновляйте настройки приватности на своих социальных медиа-аккаунтах. Ограничьте доступ к вашей личной информации, такой как адрес электронной почты, номер телефона и местоположение, только для доверенных контактов [ChatGPT].

3. Какие возникают проблемы при разработке методов и средств защиты ПД, противодействующих OSINT?

Постоянное развитие технологий. Злоумышленники постоянно разрабатывают новые методы и техники для получения доступа к данным и обхода систем безопасности. Поэтому необходимо постоянно обновлять и улучшать методы и средства защиты [GigaCHAT]. Методы и средства защиты ПД должны постоянно развиваться и адаптироваться к новым угрозам и технологиям. Это требует регулярного мониторинга и обновления системы защиты [ChatGPT].

Недостаток ресурсов. Разработка и внедрение эффективных методов и средств защиты требует значительных финансовых и временных ресурсов. Некоторые компании и организации могут не иметь достаточных ресурсов для внедрения современных мер безопасности [GigaCHAT]. Разработке и внедрению новых систем безопасности может потребоваться значительное количество времени, денег и человеческих ресурсов [YandexGPT].

Сложность обнаружения. Определить все возможные угрозы и способы их реализации может быть сложно, что затрудняет создание универсальных систем защиты [YandexGPT]. Одной из проблем является сложность обнаружения персональных данных, которые могут быть доступны через OSINT-исследования. Ведь ПД могут быть разбросаны в различных источниках, их агрегирование может потребовать времени и ресурсов [ChatGPT].

Противоречия между защитой и доступностью. Баланс между защитой ПД и обеспечением доступности может стать вызовом. Всеобъемлющая защита может ограничить доступ к информации, которая может быть полезна для различных операций и исследований [ChatGPT].

Стратегическое планирование. Разработка эффективных методов защиты ПД требует стратегического планирования. Важно определить, какие именно данные нуждаются в защите, и какие методы и средства будут наиболее эффективны для противодействия OSINT [ChatGPT].

Вывод. В данной статье методом e-SLR изучена проблема обеспечения безопасности персональных данных при использовании злоумышленниками OSINT на основе анализа 48 источников литературы и применении искусственного интеллекта.

В результате обзора обнаружены следующие угрозы для безопасности персональных данных при использовании злоумышленниками OSINT: сбор информации /обнаружение конфиденциальной информации; социальная инженерия; нарушение конфиденциальности; кибершпионаж; фишинг; утечка данных; обнаружение уязвимостей информационных систем.

Определены средства защиты для персональных данных пользователя от атак с использованием OSINT: межсетевые экраны (файрволлы); средства мониторинга сети; средства обнаружения попыток несанкционированного доступа (вторжения); нейронные сети; организационные методы; настройка приватности; сильные пароли и двухфакторная

аутентификация; шифрование данных; использование VPN; резервное копирование данных.

Рассмотрены сложности при создании средств защиты для персональных данных пользователя от атак с использованием OSINT: огромный объем информации; недостоверность информации; трудоемкость анализа информации; ненадежность источников данных; сложность интеграции / технические вызовы; ограничения законодательства; недостаточная осведомленность пользователей.

Предложенный в статье метод e-SLR является более эффективным, чем классический SLR, потому что выявил дополнительные средства защиты: прокси-серверы и серверы аутентификации, и сложности разработки средств защиты: постоянное развитие технологий, недостаток ресурсов, сложность обнаружения, противоречия между защитой и доступностью, стратегическое планирование.

Практическое применение настоящего исследования видится следующим образом:

1. Повышение осведомленности пользователей и организаций для принятия необходимых мер защиты своих данных и обучению своих сотрудников и пользователей правилам безопасности для предотвращения киберугроз.
2. Разработка предупредительных мер и средств защиты. Исследование позволяет лучше понять техники и инструменты, которые могут использоваться злоумышленниками при сборе и анализе открытой информации, что позволяет разработать соответствующие меры и средства защиты данных.
3. Обнаружение тенденций. Выявлены тренды и новые методы, которые злоумышленники используют для доступа к чувствительной информации, что позволяет развивать новые технологии обнаружения и защиты для опережения киберугроз.

Библиографический список:

1. Грызунов, В. В. Особенности применения технологических методов в социальной инженерии / В. В. Грызунов, О. С. Шкреба // *Технико-технологические проблемы сервиса*. – 2018. – № 4(46). – С. 90-94.
2. Выбор моделей доверия при интеграции распределенных информационных систем критического применения / В. В. Грызунов, А. А. Корниенко, М. Л. Глухарев, А. С. Крюков // *Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы*. – 2021. – № 4. – С. 79-90. – DOI 10.48612/jisp/ev3e-fmtu-x25h.
3. Романова, Н. Н. Особенности организации безопасной разработки приложений при использовании методов экстремального программирования / Н. Н. Романова, В. В. Грызунов // *Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право*. – 2022. – №4(44). – С. 78-86.
4. Грызунов, В. В. Модель целенаправленных агрессивных действий на информационно-вычислительную систему // Человеческий фактор в сложных технических системах и средах (Эрго-2018): Труды Третьей международной науч.-практ. конф., Санкт-Петербург, 07 июля 2018 г. Под ред. А. Н. Анохина, А. А. Обознова, П. И. Падерно, С. Ф. Сергеева. – Санкт-Петербург: Межрегиональная общественная организация "Эргономическая ассоциация", 2018. С. 300-305.
5. Дворянkin О. А. OSINT, Pentest и нетсталкинг-информационные технологии интернета // *Национальная ассоциация ученых*. – 2022. – №. 84-2. – С. 6-13.
6. Грызунов, В. В. Концептуальная модель адаптивного управления геоинформационной системой в условиях дестабилизации // *Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы*. – 2021. – № 1. – С. 102-108.
7. Hwang Y. W. et al. Current status and security trend of osint // *Wireless Communications and Mobile Computing*. – 2022. – Т. 2022.
8. Грызунов, В. В. Структурно-функциональный синтез модели системы предотвращения вторжений // *Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы*. – 2006. – № 2. – С. 31-38.
9. Унгурияну Т.Н., Жамалиева Л.М., Гржибовский А.М. Краткие рекомендации по подготовке систематических обзоров к публикации // *West Kazakhstan Medical Journal*. 2019. №1 (61), URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kratkie-rekomendatsii-po-podgotovke-sistematicheskikh-obzоров-k-publikatsii> (дата обращения: 21.11.2023).
10. Современные технологии поиска информации в открытых источниках Дворянkin О.А., Клочкова Е.Н. В сборнике: *Информационная безопасность: вчера, сегодня, завтра*. Сборник статей по материалам VI Всероссийской научно-практической конференции. Москва, 2023. С. 64-68.
11. Şandor A. An Intelligence Perspective on Privacy and Data Protection Risks in Social Media // *International conference knowledge-based organization*. – 2020. – Т. 26. – №. 1. – С. 151-156.
12. Колосов Д. В. Разработка системы поиска информации о физических лицах, на основе открытых данных с использованием технологий искусственного интеллекта // *38.03. 05 Бизнес-информатика*. – 2021.
13. Идентификация источников угроз информационной безопасности государственных информационных систем на основе открытых данных в интернете Гладнев В.В., Малый М.В., Стойчин К.Л., Пономарева О.А. Идентификация источников угроз информационной безопасности государственных информационных систем на основе открытых данных в интернете, В сборнике: *Безопасность информационного пространства*. дополне-

- ние к сборнику научных трудов XXI Всероссийской науч.-практ. конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Екатеринбург, 2023. С. 31-34.
14. Pastor-Galindo J. et al. The not yet exploited goldmine of OSINT: Opportunities, open challenges and future trends // IEEE Access. – 2020. – Т. 8. – С. 10282-10304.
 15. Абрамова А. Г. Современные проблемы осуществления защиты персональных данных в сети: основополагающие принципы защиты персональных данных // Регион и мир. – 2020. – №. 4. – С. 21-25.
 16. Коломышев А. С., Вердиев О. Р. Как предотвратить утечку персональных данных // StudNet. – 2022. – Т. 5. – №. 7. – С. 7857-7864.
 17. Борисов Р. С., Ефименко А. А. Протокол анонимизации наборов данных для публикации в открытых источниках // Правовая информатика - 2023 - №2.
 18. Воложанина Д. Н. Пересмотр процедуры оценки защищенности методами OSINT в условиях нестабильной международной политической обстановки // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2022. – С. 261-264.
 19. Evangelista J. R. G. et al. Systematic literature review to investigate the application of open source intelligence (OSINT) with artificial intelligence // Journal of Applied Security Research. – 2021. – Т. 16. – №. 3. – С. 345-369.
 20. Tundis A., Ruppert S., Mühlhäuser M. A feature-driven method for automating the assessment of OSINT cyber threat sources // Computers & Security. – 2022. – Т. 113. – С. 102576.
 21. Stodelov D., Miloslavskaya N. Open Source Intelligence Tools // Procedia Computer Science. – 2022. – Т. 213. – С. 83-88.
 22. Bryushinin A. O., Dushkin A. V., Melshiyani M. A. Automation of the Information Collection Process by Osint Methods for Penetration Testing During Information Security Audit // 2022, Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). – IEEE, 2022. – С. 242-246.
 23. Обеспечение информационной безопасности с помощью разведки по открытым источникам (OSINT) Шармаев В.И., Андреева Я.А., Василевский К.А. Вопросы защиты информации. 2022. № 2 (137). С. 45-50.
 24. Годунов Д. А., Гунаев А. И. Информационная безопасность в сети, способы ведения кибер-разведки и защиты от неё // Научный аспект. – 2021. – Т. 2. – №. 2. – С. 179-189.
 25. Oleksii Kuchmai T. S. Using open source intelligence (OSINT) as one of the effective and legitimate ways to avoid threats to the corporation // Scientific and practical cyber security journal. – 2021.
 26. Даниленко, В. П. Использование открытых данных (OSINT) в целевых атаках / В. П. Даниленко // Автоматизация в промышленности. – 2023. – № 7. – С. 30-31. – EDN ZYYLQS.
 27. Обнаружение целенаправленных атак веб-ориентированной обманной системой, основанной на алгоритме антиклассификации. Вишневецкий А.С., Ключарев П.Г. Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2020. Т. 22. № 3. С. 5-17.
 28. Матецкий М. А. Инструменты противодействия безопасности данных организации // Школа молодых новаторов. – 2023. – С. 80-83.
 29. Kanta A., Coisel I., Scanlon M. A survey exploring open source Intelligence for smarter password cracking // Forensic Science International: Digital Investigation. – 2020. – Т. 35. – С. 301075.
 30. Kanta A., Coisel I., Scanlon M. Smarter password guessing techniques leveraging contextual information and OSINT // 2020 International Conference on Cyber Security and Protection of Digital Services (Cyber Security). IEEE, 2020. – С. 1-2.
 31. Миронова Н. Г. Арсенал технологий и методов информационного противодействия // Актуальные аспекты развития науки и общества в эпоху цифровой трансформации. – 2023. – С. 120-128.
 32. Репетий, Е. О. Способы защиты персональных данных в интернете / Е. О. Репетий // Научный аспект. – 2023. – Т. 8, № 3. – С. 963-968. – EDN OBQRJH.
 33. Сидорова, М. Е. Разведка по открытым источникам данных и ее применение для решения задач кибербезопасности / М. Е. Сидорова, А. Р. Кузьмин // Вестник Российского нового университета., Серия: Сложные системы: модели, анализ и управление. – 2023. – № 1. – С. 61-74. – DOI 10.18137/RNU.V9187.23.01.P.61. – EDN KKCSVG.
 34. Kassim S. R. B. M., Li S., Arief B. How national CSIRTs leverage public data, OSINT and free tools in operational practices: An empirical study // Cyber Security: A Peer-Reviewed Journal. – 2022. – Т. 5. – №. 3. – С. 251-276.
 35. Riebe T. et al. Values and Value Conflicts in the Context of OSINT Technologies for Cybersecurity Incident Response: A Value Sensitive Design Perspective // Computer Supported Cooperative Work (CSCW). – 2023. – С. 1-47.
 36. Govardhan D. et al. Key Challenges and Limitations of the OSINT Framework in the Context of Cybersecurity // 2023 2nd International Conference on Edge Computing and Applications (ICECAA). – IEEE, 2023. – С. 236-243.
 37. González-Granadillo G. et al. ETIP: An Enriched Threat Intelligence Platform for improving OSINT correlation, analysis, visualization and sharing capabilities // Journal of Information Security and Applications. – 2021. – Т. 58. – С. 102715.
 38. AlKilani H., Qusef A. OSINT techniques integration with risk assessment ISO/IEC 27001 // International Conference on Data Science, E-Learning and Information Systems 2021. – 2021. – С. 82-86.
 39. Lee D., Lee H. K. Study on OSINT-Based Security Control Monitoring Utilization Plan // International Conference on Software Engineering, Artificial Intelligence, Networking and Parallel/ Distributed Computing. – Cham: Springer International Publishing, 2022. – С. 161-172.
 40. Использование OSINT для мониторинга угроз Жулев А.С. В книге: Вопросы информационной безопасности в современных условиях. Материалы студенческой научно-практической конференции. Самара, 2022. С. 8.
 41. Иванов В. Ю. Использование OSINT в раскрытии и расследовании преступлений // Вестник Уральского юридического института МВД России. – 2023. – №. 1 (37). – С. 62-66.
 42. Hubbard J., Bendiab G., Shiaeles S. IPASS: A Novel Open-Source Intelligence Password Scoring System // 2022 IEEE International Conference on Cyber Security and Resilience (CSR). – IEEE, 2022. – С. 90-95.
 43. Таракджи М. Я., Ортис С., Паюсова Т. И. Обеспечение защиты данных от утечек через открытые источники // Математическое и информационное моделирование. – 2023. – С. 388-399.
 44. Характеристика OSINT и эффективность его использования Бондаренко Н.А., Гусева Т.М. В сборнике: Проблемы проектирования, применения и безопасности информационных систем в условиях цифровой экономики., Материалы XXII Международной научно-практической конференции. Ростов-на-Дону, 2022. С. 322-327.

45. Качалов, А. Г. Подготовка специалистов по работе с открытыми данными в сети интернет (OSINT) в гражданских и ведомственных вузах / А. Г. Качалов, М. М. Лантаев // Юридическая наука: история и современность. – 2021. – № 9. – С. 98-106. – EDN MXXJOE.
46. Khan S., Wallom D. A system for organizing, collecting, and presenting open-source intelligence // Journal of Data, Information and Management. – 2022. – Т. 4. – №. 2. – С. 107-117.
47. Филатова Д. К., Обласов А. А. Роль искусственного интеллекта в разведке с открытым исходным кодом (OSINT) // Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению. – 2022. – С. 297-299.
48. Suryotrisongko H. et al. Robust botnet DGA detection: Blending XAI and OSINT for cyber threat intelligence sharing // IEEE Access. – 2022. – Т. 10. – С. 34613-34624.

References:

1. Gryzunov V. V. Features of the application of technological methods in social engineering. V. V. Gryzunov, O. S. Shkreba. *Technical and technological problems of service*. 2018;4 (46): 90-94. (In Russ)
2. Selection of trust models in the integration of distributed information systems of critical application. V. V. Gryzunov, A. A. Kornienko, M. L. Glukharev, A. S. Kryukov. *Problems of information security. Computer systems*. 2021; 4: 79-90. - DOI 10.48612/jisp/ev3e-fmtu-x25h. (In Russ)
3. Romanova, N. N., V. V. Gryzunov Features of the organization of safe application development using extreme programming methods. *Information technologies and systems: management, economics, transport, law*. 2022;4 (44): 78-86. (In Russ)
4. Gryzunov, V. V. Model of targeted aggressive actions on the information and computing system / V. V. Gryzunov // The human factor in complex technical systems and environments (Ergo-2018): Proceedings of the Third international scientific and practical conference, St. Petersburg, July 07, 2018 / Edited by A. N. Anokhin, A. A. Oboznov, P. I. Paderno, S. F. Sergeev. - St. Petersburg: Interregional public organization "Ergonomic Association", 2018; 300-305. (In Russ)
5. Dvoryankin O. A. OSINT, Pentest and Netstalking *Information Technologies of the Internet. National Association of Scientists*. 2022; 84-2: 6-13. (In Russ)
6. Gryzunov, V. V. Conceptual Model of Adaptive Control of a Geoinformation System in the Context of Destabilization. *Problems of Information Security. Computer Systems*. 2021;1: 102-108. (In Russ)
7. Hwang Y. W. et al. Current Status and Security Trends of OSINT. *Wireless Communications and Mobile Computing*. 2022; 2022.
8. Gryzunov, V. V. Structural and Functional Synthesis of an Intrusion Prevention System Model. *Problems of Information Security. Computer Systems*. 2006; 2:31-38. (In Russ)
9. Unguryanu T.N., Zhamalieva L.M., Grzhibovsky A.M. Brief recommendations for preparing systematic reviews for publication. *West Kazakhstan Medical Journal*. 2019. No. 1 (61)., URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kratkirekomendatsii-po-podgotovke-sistemicheskikh-obzorov-k-publikatsii> (date of access: 21.11.2023).
10. Modern technologies for searching information in open sources Dvoryankin O.A., Klochkova E.N. In the collection: Information security: yesterday, today, tomorrow. *Collection of articles based on the materials of the VI All-Russian scientific and practical conference*. Moscow, 2023; 64-68. (In Russ)
11. Şandor A. An Intelligence Perspective on Privacy and Data Protection Risks in Social Media. *International conference knowledge-based organization*. 2020; 26(1): 151-156.
12. Kolosov D. V. Development of a system for searching for information about individuals based on open data using artificial intelligence technologies. 38.03. 05 Business Informatics. 2021. (In Russ)
13. Identification of sources of threats to the information security of state information systems based on open data on the Internet Gladnev V.V., Maly M.V., Stoychin K.L., Ponomareva O.A. Identification of sources of threats to the information security of state information systems based on open data on the Internet. In the collection: Security of information space. Supplement to the collection of scientific papers of the XXI All-Russian scientific and practical conference of students, graduate students and young scientists. Ekaterinburg, 2023;31-34. (In Russ)
14. Pastor-Galindo J. et al. The not yet exploited goldmine of OSINT: Opportunities, open challenges and future trends // IEEE Access. 2020; 8:10282-10304.
15. Abramova A. G. Modern problems of implementing personal data protection on the network: fundamental principles of personal data protection. *Region and the World*. 2020;4:21-25. (In Russ)
16. Kolomytsev A. S., Verdiev O. R. How to prevent personal data leakage. *StudNet*. 2022; 5.(7): 7857-7864. (In Russ)
17. Borisov R. S., Efimenko A. A. Protocol for anonymizing data sets for publication in open sources. *Legal informatics*. 2023; 2. (In Russ)
18. Volozhanina D. N. Revision of the procedure for assessing security using OSINT methods in an unstable international political situation. *Actual problems of aviation and cosmonautics*. 2022; 261-264. (In Russ)
19. Evangelista J. R. G. et al. Systematic literature review to investigate the application of open source intelligence (OSINT) with artificial intelligence. *Journal of Applied Security Research*. 2021; 16(3): 345-369.
20. Tundis A., Ruppert S., Mühlhäuser M. A feature-driven method for automating the assessment of OSINT cyber threat sources // *Computers & Security*. 2022; 113: 102576.
21. Stodelov D., Miloslavskaya N. Open Source INTelligence Tools. *Procedia Computer Science*. 2022; 213: 83-88.
22. Bryushinin A. O., Dushkin A. V., Melshiyani M. A. Automation of the Information Collection Process by Osint Methods for Penetration Testing During Inf.
23. Ensuring Information Security Using Open Source Intelligence (OSINT) Sharmaev V.I., Andreeva Ya.A., Vasilevsky K.A. *Information Security Issues*. 2022; 2 (137): 45-50. (In Russ)
24. Godunov D.A., Gunaev A.I. Information Security on the Network, Methods of Conducting Cyber Intelligence and Protecting Against It. *Scientific Aspect*. 2021; 2(2):179-189. (In Russ)
25. Oleksii Kuchmai T.S. Using open source intelligence (OSINT) as one of the effective and legitimate ways to avoid threats to the corporation // *Scientific and practical cyber security journal*. 2021.
26. Danilenko, V. P. Using open data (OSINT) in targeted attacks. *Automation in industry*. 2023;7:30-31. (In Russ)

27. Detection of targeted attacks by a web-oriented deception system based on the anti-classification algorithm Vishnevsky A.S., Klyucharev P.G. *Neurocomputers: development, application*. 2020; 22(3): 5-17. (In Russ)
28. Matetsky M.A. Tools for countering organizational data security. *School of Young Innovators*. 2023:80-83(In Russ)
29. Kanta A., Coisel I., Scanlon M. A survey exploring open source Intelligence for smarter password cracking. *Forensic Science International: Digital Investigation*. 2020; 35: 301075.
30. Kanta A., Coisel I., Scanlon M. Smarter password guessing techniques leveraging contextual information and OSINT. 2020 International Conference on Cyber Security and Protection of Digital Services (Cyber Security). IEEE, 2020; 1-2.
31. Mironova N. G. Arsenal of technologies and methods of information counteraction. Current aspects of the development of science and society in the era of digital transformation. 2023;120-128. (In Russ)
32. Repetiy, E.O. Ways to protect personal data on the Internet. *Scientific aspect*. 2023; 8(3): 963-968. (In Russ)
33. Sidorova, M. E. Open source intelligence and its application to solving cybersecurity problems / M. E. Sidorova, A. R. Kuzmin // *Bulletin of the Russian New University., Series: Complex systems: models, analysis and management*. 2023; 1:61-74. – DOI 10.18137/RNU.V9187.23.01.P.61. – EDN KKCSVG. (In Russ)
34. Kassim S. R. B. M., Li S., Arief B. How national CSIRTs leverage public data, OSINT and free tools in operational practices: An empirical study. *Cyber Security: A Peer-Reviewed Journal*. 2022;5(3):251-276.
35. Riebe T. et al. Values and Value Conflicts in the Context of OSINT Technologies for Cybersecurity Incident Re-sponse: A Value Sensitive Design Perspective. *Computer Supported Cooperative Work (CSCW)*. 2023;1-47.
36. Govardhan D. et al. Key Challenges and Limitations of the OSINT Framework in the Context of Cybersecurity // 2023 2nd International Conference on Edge Computing and Applications (ICECAA). – IEEE, 2023;236-243.
37. González-Granadillo G. et al. ETIP: An Enriched Threat Intelligence Platform for improving OSINT correlation, analysis, visualization and sharing capabilities. *Journal of Information Security and Applications*. 2021;58:102715.
38. AlKilani H., Qusef A. OSINT techniques integration with risk assessment ISO/IEC 27001. *International Conference on Data Science, E-Learning and Information Systems 2021*; 2021: 82-86.
39. Lee D., Lee H. K. Study on OSINT-Based Security Control Monitoring Utilization Plan. *International Conference on Software Engineering, Artificial Intelligence, Networking and Parallel, Distributed Computing*. Cham: Springer International Publishing, 2022; 161-172.
40. Using OSINT to Monitor Threats Zhulev A.S. In the book: *Information Security Issues in Modern Conditions. Proceedings of the Student Scientific and Practical Conference*. Samara, 2022;8. (In Russ)
41. Ivanov V. Yu. Using OSINT in Detecting and Investigating Crimes. *Bulletin of the Ural Law Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia*. 2023;1(37):62-66. (In Russ)
42. Hubbard J., Bendiab G., Shiaeles S. IPASS: A Novel Open-Source Intelligence Password Scoring System // 2022 IEEE International Conference on Cyber Security and Resilience (CSR). IEEE, 2022; 90-95.
43. Tarakdzhi M. Ya., Ortiz S., Payusova T. I. Ensuring data protection from leaks through open sources // *Mathematical and information modeling*. 2023; 388-399. (In Russ)
44. Characteristics of OSINT and the effectiveness of its use Bondarenko N.A., Guseva T.M. In the collection: *Problems of design, application and security of information systems in the digital economy., Proceedings of the XXII International Scientific and Practical Conference*. Rostov-on-Don. 2022;322-327. (In Russ)
45. Kachalov, A. G. Training of specialists in working with open data on the Internet (OSINT) in civil and departmental universities / A. G. Kachalov, M. M. Lantaev. *Legal science: history and modernity*. 2021;9: 98-106. – EDN MXKJOE.
46. Khan S., Wallom D. A system for organizing, collecting, and presenting open-source intelligence. *Journal of Data, Information and Management*. 2022; 4(2): 107-117.
47. Filatova D.K., Oblasov A.A. The Role of Artificial Intelligence in Open Source Intelligence (OSINT) // *Science, Innovation and Technology: from Ideas to Implementation*. 2022: 297-299. (In Russ)
48. Suryotrisongko H. et al. Robust botnet DGA detection: Blending XAI and OSINT for cyber threat intelligence shar-ing. *IEEE Access*. 2022; 10: 34613-34624.

Сведения об авторах:

Романова Надежда Николаевна, аспирант кафедры информатики и информационной безопасности; romanova.nadezhda.00@mail.ru

Грызунов Виталий Владимирович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры прикладной информатики и информационных технологий; viv1313r@mail.ru ORCID 0000-0003-4866-217X

Information about authors:

Nadezhda N. Romanova, Postgraduate student, Department of Computer Science and Information Security; romanova.nadezhda.00@mail

Vitaly V. Gryzunov, Dr. Sci. (Eng), Assoc. Prof., Prof., Department of Applied Computer Science and Information Technology; viv1313r@mail.ru ORCID 0000-0003-4866-217X

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/ Received 01.03.2024.

Одобрена после рецензирования / Revised 30.03.2024.

Принята в печать /Accepted for publication 30.03.2024.

Компаративный анализ основных методов фильтрации кадров для повышения спектрального разрешения видеопотока

А.Ф. Сальников¹, К.В. Иванова¹, Н.И. Меркулова²

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет,

¹14990, г. Пермь, Комсомольский проспект, д. 29, Россия,

²Воронежский институт МВД России,

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

Резюме. Цель. В настоящее время актуальной является задача повышения спектральной разрешимости видеопотока с использованием современных методов фильтрации кадров. В работе рассмотрены и проанализированы различные методы фильтрации кадров, проведен их детальный сравнительный анализ. Полученные данные способствуют дальнейшей разработке различных материалов по повышению спектрального разрешения видеопотока. **Метод.** В научной литературе разработано большое количество различных подходов для повышения спектральной разрешимости видеопотока с использованием современных методов фильтрации кадров. В данной работе проанализированы самые основные: линейная пространственная фильтрация; нелинейная пространственная фильтрация; пространственно-частотная фильтрация; фильтрация с использованием Фурье-анализа; фильтрация на основе вейвлет-анализа. **Результат.** В ходе рассмотрения и сравнительного анализа методов фильтрации кадров были решены следующие задачи: проведена предварительная систематизация характеристик рассматриваемых методов с целью разработки новых алгоритмов и их реализации для улучшения качества изображения, увеличения детализации и четкости видеопотока; проанализированы различные методы фильтрации кадров, способствующие повышению спектральной разрешимости видеопотока, рассмотрено их влияние на качество видеоконтента; установлено, что для повышения спектральной разрешимости видеопотока необходимо использование комбинированного фильтра. Вышеперечисленные факты позволят в дальнейшем разработать методические рекомендации по повышению спектральной разрешимости видеопотока. **Вывод.** Рассмотренные подходы повышения спектральной разрешимости видеопотока с использованием современных методов фильтрации кадров являются предпочтительными при повышении спектральной разрешимости изображений, так как используют все положительные стороны линейной, нелинейной и пространственно-частотной фильтрации.

Ключевые слова: спектральное разрешение, моделирование, фильтрация кадров, видеопоток, процесс, анализ

Для цитирования: А.Ф. Сальников, К.В. Иванова, Н.И. Меркулова. Компаративный анализ основных методов фильтрации кадров для повышения спектрального разрешения видеопотока. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2024; 51(3):145-153. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-3-145-153

Analysis of the main approaches to modeling management processes for special-purpose organizational and technical systems

A.F. Salnikov¹, K.V. Ivanova², N.I. Merkulova²

¹Perm National Research Polytechnic University,

¹114990, Perm, Komsomolsky Prospekt, 29, Russia,

²Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia,

²53 Patriotov Ave., Voronezh 394065, Russia

Abstract. Objective. Currently, the task of increasing the spectral solvability of a video stream using modern frame filtering methods is urgent. Various methods of frame filtering are

considered and analyzed in the work, and their detailed comparative analysis is carried out. The obtained data contribute to the further development of various materials to increase the spectral resolution of the video stream. **Method.** A large number of different approaches have been developed in the scientific literature to increase the spectral resolution of a video stream using modern frame filtering methods, and the most basic ones are analyzed in this paper: linear spatial filtering; nonlinear spatial filtering; spatial frequency filtering; filtering using Fourier analysis; filtering based on wavelet analysis. **Result.** A preliminary systematization of the characteristics of the methods under consideration has been carried out in order to develop new algorithms and implement them to improve image quality, increase detail and clarity of the video stream; various frame filtering methods have been analyzed, contributing to an increase in the spectral resolution of the video stream, and their impact on the quality of video content has been considered; during the analysis, it was found that in order to increase the spectral solvability of the video stream, it is necessary to use a combined filter. The above facts will allow us to further develop methodological recommendations for increasing the spectral solvability of the video stream. **Conclusion.** The considered approaches to increasing the spectral resolution of a video stream using modern frame filtering methods are preferable when increasing the spectral resolution of images, since they use all the positive aspects of linear, nonlinear and spatial frequency filtering.

Keywords: spectral resolution, modeling, frame filtering, video stream, process, analysis

For citation: A.F. Salnikov, K.V. Ivanova, N.I. Merkulova. Comparative analysis of the main frame filtering methods to increase the spectral resolution of the video stream. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2024; 51(3):145-153. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-3-145-153.

Введение. Современный мир невозможно представить без различного рода видеотрансляций, и спрос на высококачественное видео с каждым годом только растет. Одним из ключевых факторов повышения качества видеопотока является спектральная разрешимость, которая определяет способность видеосистемы отображать различные частоты входного сигнала. В данной работе представлены и проанализированы различные методы фильтрации кадров, способствующие повышению спектрального разрешения видеопотока, рассмотрено их влияние на качество изображения видеоконтента.

Постановка задачи. Целью данной работы является проведение детального сравнительного анализа различных методов фильтрации кадров для повышения спектрального разрешения видеопотока.

Для достижения поставленной цели необходимо рассмотреть и проанализировать существующие методы и технологии для разработки новых алгоритмов и их реализацию с целью улучшения качества изображения, увеличения детализации и четкости видеопотока. Кроме того необходимым является рассмотрение и анализ методов фильтрации кадров и выбор наиболее эффективного подхода. Выше перечисленное позволит в дальнейшем разработать методические рекомендации по повышению спектральной разрешимости видеопотока.

Методы исследования. На сегодняшний день существует огромное количество методов фильтрации кадров, в данном исследовании остановимся на основных [1, 2]:

1. Линейная пространственная фильтрация.
2. Нелинейная пространственная фильтрация.
3. Пространственно-частотная фильтрация.
4. Фильтрация с использованием Фурье-анализа.
5. Фильтрация на основе вейвлет-анализа.

Далее рассмотрим каждый из методов подробнее. В нашей работе мы придерживаемся следующей дефиниции пространственной фильтрации.

Пространственная фильтрация – процесс, в котором каждый пиксель выходного изображения зависит от значений пикселей входного изображения в некоторой его окрестности. Для реализации пространственной фильтрации применяются фильтры

с конечной импульсной характеристикой (КИХ-фильтры), которые часто реализуются в виде масок.

Линейная пространственная фильтрация. Представляет собой процесс преобразования кадров путем линейной свертки входного изображения. Выделение линейных операций в отдельный класс обосновано тем, что [3, 4]:

- 1) Многие физические механизмы формирования кадров линейны по своей природе;
- 2) Для исследования свойств линейных преобразований разработан удобный аппарат частотных передаточных функций;
- 3) Линейные алгоритмы просты и удобны для реализации на ЭВМ и в специализированных устройствах обработки сигналов.

Кадры могут повреждаться самыми разными способами: шум видеодатчиков, помехи при передачах через каналы связи и другие. Учитывая данные факты, линейная фильтрация использует маски, имеющие независимые от изображения коэффициенты, а обработка осуществляется на основе матриц подавления шумов, процедура которой, не вызывает смещения яркости изображения.

Одним из явных примеров такой фильтрации, использующий численную аппроксимацию процедуры двумерного дифференцирования является преобразование Собела. Данное преобразование осуществляется с помощью следующей маски [5]:

$$\begin{pmatrix} -1 & -2 & -1 \\ -2 & 15 & -2 \\ -1 & -2 & -1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

Преобразование Собела является знакопеременной функцией, что означает визуализацию в виде распределения модуля производной.

Другим примером могут послужить восемь процедур оценивания пространственных градиентов вдоль различных направлений. Так, значениями одной из процедур под названием «север» являются [5]:

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ -1 & -1 & -1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

Результат таких процедур аналогичен преобразованию Собела.

Нелинейная пространственная фильтрация. Линейная фильтрация представляет собой эффективный метод обработки изображений, однако в некоторых случаях могут возникать другие типы помех.

Например, при наличии импульсного шума (отдельных точек с максимальной или минимальной яркостью, расположенных хаотически на изображении), использование линейных фильтров неэффективно [6]. Такая ситуация складывается из-за того, что каждый импульс на входе вызывает импульсный отклик на выходе фильтра, и их совокупность приводит к распространению помех на всю область изображения.

Такая проблема решается с использованием нелинейных фильтров. Возможности таких фильтров заключаются в определении позиции каждого импульса и замене их значениями фиксированной или случайной величины. В отличие от линейных фильтров в данном случае используются маски с зависимыми от изображения коэффициентами. Одним из таких примеров являются медианные фильтры, предложенные в 1971 году Джоном Тьюки. В медианной фильтрации используются эвристические методы обработки, которые основаны на математическом аппарате.

Основной идеей медианной фильтрации является использование двумерного окна, последовательно обрабатывающего каждую точку кадра. Результатом является последовательность оценок. Конечно, обработка в различных пикселях кадра независима, однако в целях ускорения целесообразно применение преобразования Собела.

В качестве другого примера разберем преобразование Уоллиса. Данное преобразование является всего лишь обобщением статистического дифференцирования, позволяющим улучшить изображение:

$$g(i, j) = \frac{A\sigma_d}{A\sigma_d(i, j) + \sigma_d} (f(i, j) - \bar{f}(i, j)) + (am_d + (1 - a)f(i, j)), \quad (3)$$

где: $f(i, j)$, $\sigma(i, j)$ – среднее и среднеквадратичное отклонение, которые оцениваются в окне размера $(2L + 1) \times (2L + 1)$; m_d, σ_d – среднее и среднеквадратичное отклонение выходного изображения; a – коэффициент контрастирования границ из диапазона; A – коэффициент устранения выбросов.

Пространственно - частотная фильтрация. Предназначена для реставрации и улучшения кадров. Процесс записи видео не является идеальным и в результате происходит запись искаженной копии оригинала. Такое искажение возникает по многим причинам, включая размытие, нелинейность регистрирующей среды и наличие шумов [7].

Существует множество различных способов устранения данных недостатков, один из которых, пространственно-инвариантный линейный инверсный фильтр, заключающийся в ограничении полосы частот кадра:

$$h_{inv}(i, j) \oplus h(i, j) = \delta(i, j) = \begin{cases} 1, i = j \\ 0, i \neq j \end{cases} \quad (4)$$

Восстановление изображения с помощью инверсного фильтра приводит к тому, что полученное изображение содержит оригинальные данные и шум, возникающий при использовании инверсного фильтра.

Данная процедура не решает проблему краевых эффектов и пропусков в передаточной функции, которые могут возникнуть в рабочем диапазоне. Несмотря на то, что метод относительно прост в реализации, он обладает низкой помехоустойчивостью и ограниченностью классов для обработки кадров.

Фильтр Винера может эффективно решить проблему наличия нулей в передаточной функции формирующей системы в рабочем диапазоне частот. Он имеет свойство равняться нулю на частотах, где передаточная функция обращается в ноль. При снижении спектральной плотности мощности исходного изображения на высоких частотах, функция фильтра Винера также стремится к нулю, а при отсутствии шумов (на низких частотах) переходит в режим инверсного фильтрования.

Применение фильтра Винера, основанного на использовании спектральных характеристик кадра, исключает сингулярность, обусловленную наличием нулей передаточной функции. Это позволяет в разы повысить помехоустойчивость даже при наличии краевых эффектов, появляющихся в виде осциллирующей помехи.

Фильтрация Фурье. В теории сигналов и изображений широко используются энергетические характеристики. Тригонометрический ряд Фурье записывается в следующем виде [8]:

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n * \cos n\omega_1 t + b_n * \sin n\omega_1 t] \quad (5)$$

Для представления кадра в частотной области необходимо два вещественных спектра: амплитудный (c_n) и фазовый ($\phi_n = \arg c_n$).

Для получения спектрального представления кадра $x(t)$ необходимо рассмотреть предел при T , стремящемся к бесконечности.

При таком подходе угловая частота ($\omega_1 = 2\pi / T$) сходится к бесконечно малому приращению частоты ($d\omega$), а частота n -ой составляющей ряда $n\omega_1 t$ – к текущей частоте ω [9, 10]. Вместо операции суммирования возможно использование операции интегрирования, что позволяет получить следующее выражение [9]:

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{j\omega t} \left[\int_{t_1}^{t_2} x(t) e^{-j\omega t} dt \right] d\omega \quad (6)$$

Учитывая, что значения t_1 и t_2 неизвестны, определим внутренний интеграл:

$$X(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt \quad (7)$$

Исходя из установленного в выражении (7), запишем формулу (6) в следующем виде:

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} X(j\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (8)$$

Преобразования (7) и (8) являются парой преобразований Фурье, которые обеспечивают однозначное соответствие между временным представлением $x(t)$ кадра и его спектральным представлением $X(j\omega)$ в области частот.

Формула (8) описывает прямое преобразование Фурье, где функция $X(j\omega)$ представляет собой спектральную характеристику сигнала $x(t)$.

Кроме того формула (8) позволяет выполнить обратное преобразование и вычислить мгновенное значение кадра $x(t)$, если известна его спектральная характеристика $X(j\omega)$.

Ограничение преобразования Фурье приводит к необходимости использования более сложных методов анализа сигналов, таких как анализ спектрограммы, вейвлет-преобразование и другие методы многомасштабного анализа, которые позволяют анализировать локальные изменения в спектральной характеристике сигнала во времени.

Данная характеристика важна в области обработки видео- и аудиосигналов, где часто требуется анализировать быстро изменяющиеся сигналы с высокой временной и частотной разрешающей способностью.

Вейвлет – преобразования. В данном преобразовании функция $f(t)$ представляется в виде ряда из вейвлет-образующих функций, которые заменяют тригонометрические функции. Каждая функция в базисе характеризует конкретную частоту и временную локализацию. Вейвлет-образующие функции могут быть локализованы в определенной области аргумента, а в остальных областях они равны нулю или близки к нулю.

Данный факт позволяет использовать их для усиления интересующего нас эффекта в заданной области аргумента функции.

Вейвлет-коэффициенты функции $f(t)$ определяются с помощью интегральной свертки [10]:

$$W(a,b) = \frac{1}{a^k} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \varphi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (9)$$

Вейвлет-коэффициенты $W(a,b)$ зависят от трех переменных, включая время процесса. Выбор аргументов a и b может быть изменен в зависимости от конкретного приложения. Для нестационарных процессов, например, a может быть выбрано равным t , который определяет период колебаний [11].

Результаты вычислительных расчетов вейвлет-функций W могут быть представлены в виде линий уровня на различных плоскостях, таких как (a,b) , (a,t) , (b,t) и других. Такое представление позволяет визуализировать зависимость коэффициентов от выбранных параметров и проанализировать поведение процесса в различных областях.

Вейвлеты представляют собой важный инструмент для анализа, обработки сигналов и изображений различной природы на нескольких масштабах. Концепция многомасштабного анализа состоит в том, чтобы изучать сигнал на разных уровнях детализации

и использовать вейвлет-анализ для выявления особенностей, характерных для каждого уровня, и эффективной фильтрации влияния других уровней [11].

Вейвлет-преобразование может быть использовано для различных операций с изображением, таких как сглаживание или подчеркивание некоторых деталей, изменение размера изображения, выделение ключевых особенностей и улучшение его качества.

Метод вейвлет-преобразования стал эффективным и надежным инструментом в областях, где ранее применялись другие методы анализа данных, включая преобразование Фурье.

Благодаря его эффективности и устойчивости к помехам, вейвлет-преобразование представляет собой мощный инструмент для обработки результатов. Его характерные особенности в частотно-временной области и возможность использования существующих методов обработки данных позволяют расширить и дополнить возможности систем анализа за данных [12].

Обсуждение результатов. Оператор Лапласа и вейвлет-преобразования позволяют анализировать несколько кадров видеопотока одновременно, что способствует получению более точной информации о свойствах видеопотока.

Данное обстоятельство делает их лучшими методами для работы с группой кадров, что обеспечивает высокую точность и эффективность распознавания объектов на видеопотоке.

Для повышения спектральной разрешимости видеопотока рассмотрим возможность комбинированной фильтрации в два этапа.

1. Фильтрация оператором Лапласа. На первом этапе кадр подвергается алгоритму оператора Лапласа. Задачей является обнаружение краёв и выделение границ объектов. Данный оператор отлично подходит для работы с группой изображений, так как расчет не требует наличия высокой производительности аппаратных средств. Необходимо отметить, что фильтрация на данном этапе не предусматривает устранение шума.

Фильтрация кадра оператором Лапласа происходит за счет использования вторых производных [13]:

$$\nabla^2 f = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \quad (10)$$

2. Вейвлет – преобразование с использованием признаков Коэна – Добеши – Фово. На втором этапе в качестве исследуемого материала для обработки будем использовать кадры видеопотока с камеры беспилотного воздушного судна.

Рассмотрим алгоритм комбинированного фильтра для видеопотока: на вход покадрово поступает видеопоток, далее подвергается фильтрации оператором Лапласа с вейвлет – преобразованиями, затем на выходе все кадры поочередно собираются в единый видеопоток [14].

Ввиду того, что вышеперечисленный алгоритм занимает минимальное количество времени, это позволит использовать комбинированный фильтр не только в стационарном видео, но и в режиме реального времени.

Процедура многоуровневой идентификации включает в себя идентификацию исходного кадра на разных уровнях его разрешения, которая осуществляется путем пошагового восстановления изображения в соответствии с представленным алгоритмом [15].

Для этого производится контурное описание и расфокусировка объектов кадра на каждом уровне разрешения, а затем выставляется оценка идентичности, которая формируется при свертке полученного контура в исходном кадре с эталонным. Данная процедура является важным инструментом в идентификации кадров. Кадры видеопотока с применением комбинированного фильтра показаны на рис. 1.

Как видно из рис. 1 применение комбинированного фильтра значительно повышает спектральную разрешимость видеопотока за счет последовательного решения задач выделения краев и сглаживания шумов.

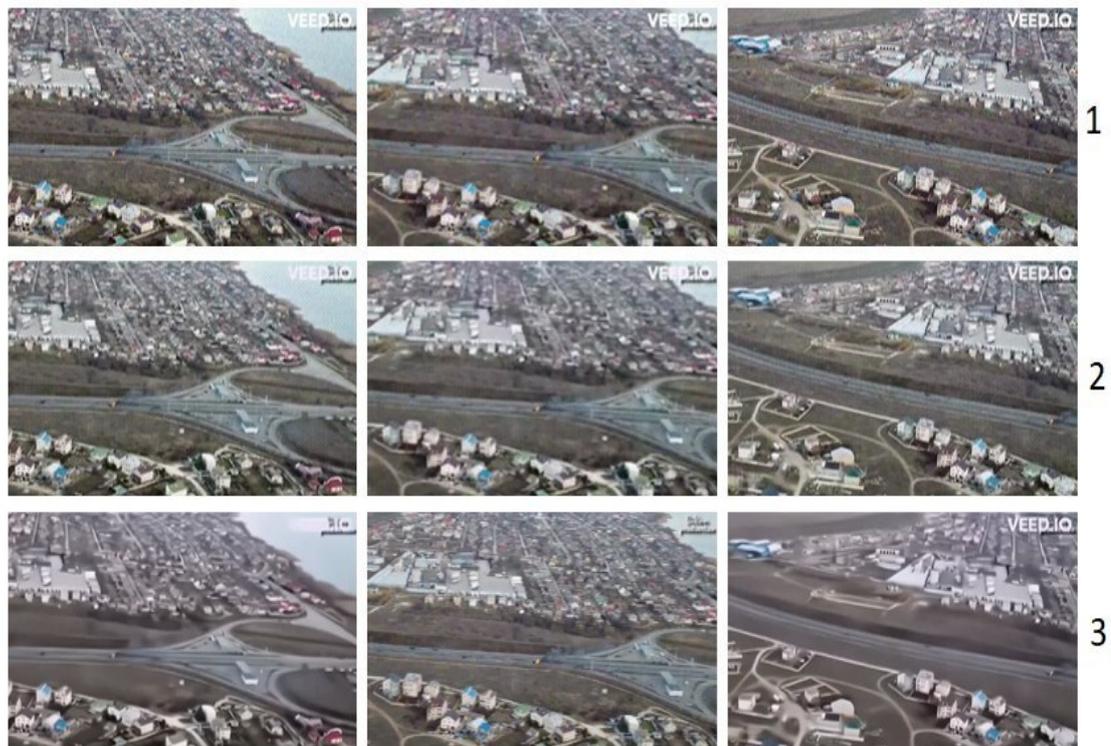


Рис. 1. Применение комбинированного фильтра на видеопоток с беспилотного воздушного судна

Fig. 1. Application of a combined filter to a video stream from an unmanned aerial vehicle

1 – исходные кадры. 2 – кадры, полученные после применения оператора Лапласа. 3 – кадры, полученные после применения вейвлет – признаков Коэна-Добеши-Фово.

Фильтрации на основе преобразования Фурье и вейвлет-анализа являются предпочтительными при повышении спектральной разрешимости изображений, так как используют все положительные стороны линейной, нелинейной и пространственно-частотной фильтрации.

Вывод. В ходе рассмотрения и сравнительного анализа методов фильтрации кадров были решены следующие задачи:

1. Проведена предварительная систематизация характеристик рассматриваемых методов с целью разработки новых алгоритмов и их реализации для улучшения качества изображения, увеличения детализации и четкости видеопотока.

2. Проанализированы различные методы фильтрации кадров, способствующие повышению спектральной разрешимости видеопотока, рассмотрено их влияние на качество видеоконтента.

3. В ходе анализа установлено, что для повышения спектральной разрешимости видеопотока необходимо использование комбинированного фильтра.

4. Вышеперечисленные факты позволят в дальнейшем разработать методические рекомендации по повышению спектральной разрешимости видеопотока.

Библиографический список:

1. Ярышев, С. Н. Видеоанализ в цифровых видеоинформационных системах безопасности : Учебное пособие / С. Н. Ярышев, В. А. Рыжова, В. В. Коротаев. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2021. – 110 с.
2. Прэтт, У. Цифровая обработка изображений / У. Прэтт. - Москва : Мир, 1982. – 790 с.
3. Обработка изображений [Электронный ресурс]: учеб. пособие. В 2 ч. Ч. 2. Цифровая обработка изображений / [сост.: Б.Н. Грудин, В.С. Плотников, С.В. Полищук]; Дальневосточный федеральный университет. – Электрон. дан. – Владивосток: Издательский дом Дальневост. федерал. ун-та, 2013.
4. 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. – DOI 10.14529/mmp200406.
5. Перспективы разработки и внедрения технологий искусственного интеллекта в войсках национальной гвардии Российской Федерации. Успенко В.Б., Миromanов Д.В., Греков А.В., Жуков Д.С., Суворов А.О., Бибик А.В., Тарутин А.В., Горячев С.Н., Минченко Д.А., Костарев С.Н., Мормуль Р.В.: Пермь: ПВИ ВНГ РФ, 2021. – 333 с.
 6. Жилин, Р. А. Обоснование критерия корректности исходных данных при моделировании оценки эффективности слабоструктурированных альтернатив систем безопасности объектов органов внутренних дел / Р. А. Жилин, А. В. Мельников, Ю. Н. Гарусов // Вестник Воронежского института МВД России. – 2022. – № 2. – С. 28-36.
 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. Мормуль, Р. В. Вейвлет-анализ - современный подход цифровой обработки сигналов и изображений применительно к новейшим образцам военной техники / Р. В. Мормуль, С. Н. Горячев, В. В. Михалев // Генерал от инфантерии Е.Ф. Комаровский - первый командир отдельного корпуса внутренней стражи России : Межвузовская научно-практическая конференция, Пермь, 23 октября 2019 года / под общ. ред. В.Ф. Купавского. – Пермь: Пермский военный институт войск национальной гвардии Российской Федерации, 2019. – С. 200-208.
 9. Воскобойников, Ю. Е. Фильтрации сигналов и изображений: фурье и вейвлет алгоритмы (с примерами в Mathcad): монография / Ю. Е. Воскобойников, А. В. Гочаков, А. Б. Колкер ; Новосиб. гос. архитектур.-строит. ун-т (Сибстрин). – Новосибирск : НГАСУ (Сибстрин), 2010. – 188 с.
 10. Жилин, Р. А. Анализ различных подходов к количественной и качественной оценке эффективности функционирования систем безопасности объектов органов внутренних дел / Р. А. Жилин, Ю. А. Дудкин // Охрана, безопасность, связь. – 2023. – № 8-3. – С. 96-100.
 11. Буй, Т.Т.Ч. Разложение цифровых изображений с помощью двумерного дискретного вейвлет-преобразования Хаара / Буй Т.Т.Ч., Спицын В.Г. // Известия Томского политехнического университета, 2011. – Т. 318. – № 5. – С. 73–76.
 12. Буй, Т.Т.Ч. Алгоритмическое и программное обеспечение для классификации цифровых изображений с помощью вейвлет-преобразования Хаара и нейронных сетей / Буй Т.Т.Ч., Фан Н.Х., В.Г. Спицын // Известия Томского политехнического университета, 2011. – Т. 319. – № 5. – С. 103–106.
 13. Обработка изображений [Электронный ресурс]: учеб. пособие. В 2 ч. Ч. 2. Цифровая обработка изображений / [сост.: Б.Н. Грудин, В.С. Плотников, С.В. Полищук]; Дальневосточный федеральный университет. – Электрон. дан. – Владивосток: Издательский дом Дальневост. федерал. ун-та, 2013. – Режим доступа: Computer university network. – Загл. с экрана.
 14. Мормуль, Р. В. Повышение спектральной разрешимости видеопотока с использованием оператора Лапласа и вейвлет- преобразований кадров / Р. В. Мормуль, Р. Х. Ханмагомедов // Альманах Пермского военного института войск национальной гвардии. – 2023. – № 2(10). – С. 95-99.
 15. Жилин, Р. А. О некоторых аспектах обеспечения безопасности охраняемого объекта / Р. А. Жилин // Охрана, безопасность, связь. – 2022. – № 7-1. – С. 27-32.

References:

1. Yaryshev S. N., V. A. Ryzhova, V. V. Korotaev Video analysis in digital video information security systems. St. Petersburg : St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, 2021;110. (In Russ)
2. Pratt, W. Digital image processing. Moscow : Mir, 1982; 790. (In Russ)
3. Image processing [Electronic resource]: textbook. stipend. At 2 p.m. 2. Digital image processing. Far Eastern Federal University. Vladivostok: Publishing House of the Far Eastern Federal. Unita, 2013. (In Russ)
4. Akhlyustin, S. B., A. V. Melnikov, R. A. Zhilin 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): 66-80. – DOI 10.14529/mmp200406. (In Russ)
5. Prospects for the development and implementation of artificial intelligence technologies in the troops of the National Guard of the Russian Federation. Uspalenko V.B., Miromanov D.V., Grekov A.V., Zhukov D.S., Suvorov A.O., Bibik A.V., Tarutin A.V., Goryachev S.N., Minchenko D.A., Kostarev S.N., Mormul R.V.: Perm: PVI VNG RF, 2021;333. (In Russ)
6. Zhilin R. A., Melnikov A.V., Yu. N. Garusov Substantiation of the criterion of correctness of the initial data in modeling the evaluation of the effectiveness of weakly structured alternatives to security systems for objects of internal affairs bodies. Bulletin of the Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia. 2022; (2): 28-36. (In Russ)

7. Modeling of the assessment of the effectiveness of the functioning of security systems of objects of internal affairs bodies / R. A. Zhilin, A.V. Melnikov, S. B. Akhlyustin, V. V. Gorlov. Voronezh : Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of the Russian Federation, 2023; 104. (In Russ)
8. Mormul, R. V., S. N. Goryachev, V. V. Mikhalev Wavelet analysis - a modern approach to digital signal and image processing in relation to the latest models of military equipment. Infantry General E.F. Komarovskiy - the first commander of a separate corps of the internal guard of Russia : Interuniversity scientific and practical conference, Perm, October 23, 2019. under the general editorship of V.F. Kupavskiy. – Perm: Perm Military Institute of the National Guard Troops of the Russian Federation, 2019; 200-208. (In Russ)
9. Voskoboinikov, Yu. E. Filtering of signals and images: Fourier and wavelet algorithms (with examples in Mathcad): monograph. Novosibirsk : NGASU (Sibstrin), 2010:188. (In Russ)
10. Zhilin, R. A. Analysis of various approaches to quantitative and qualitative assessment of the effectiveness of the functioning of security systems of objects of internal affairs bodies. Protection, security, communications, 2023; (8-3): 96-100. (In Russ)
11. Buoy, T. Decomposition of digital images using a two-dimensional discrete Haar wavelet transform. Izvestiya Tomsk Polytechnic University, 2011; 318(5):73–76. (In Russ)
12. Buoy, T., Fan N.H., V.G. Spitsyn Algorithmic and software for classification of digital images using the Haar wavelet transform and neural networks. Izvestiya Tomsk Polytechnic University. 2011;319(5): 103–106. (In Russ)
13. Image processing [Electronic resource]: textbook. stipend. At 2 p.m. 2. Digital image processing / [comp.: B.N. Grudin, V.S. Plotnikov, S.V. Polishchuk]; Far Eastern Federal University. Electron. dan. – Vladivostok: Publishing House of the Far Eastern Federal. unita, 2013. (In Russ)
14. Mormul, R. V. Increasing the spectral resolution of a video stream using the Laplace operator and wavelet transformations of frames / R. V. Mormul, R. H. Khanmagomedov. Almanac of the Perm Military Institute of the National Guard Troops, 2023; 2(10): 95-99. (In Russ)
15. Zhilin, R. A. On some aspects of ensuring the safety of a protected object. Protection, security, communications. 2022; 7-1:27-32. (In Russ)

Сведения об авторах:

Сальников Алексей Федорович, доктор технических наук, профессор кафедры ракетно-космической техники и энергетических систем; afsalnikov_1@mail.ru

Иванова Ксения Вячеславовна, аспирант; ksgorbunova@yandex.ru

Меркулова Наталья Ивановна, кандидат технических наук, доцент кафедры радиотехнических систем и комплексов охранного мониторинга; gomova.nata2008@mail.ru

Information about authors:

Alexey F. Salnikov, Dr. Sci. (Eng.), Prof.; afsalnikov_1@mail.ru

Ksenia V. Ivanova, Graduate student; ksgorbunova@yandex.ru

Natalia A. Merkulova, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof.; gomova.nata2008@mail.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/ Received 18.03.2024.

Одобрена после рецензирования/ Reviced 26.04.2024.

Принята в печать/ Accepted for publication 26.04.2024.

Обнаружение фишинговых порталов посредством алгоритмов машинного обучения

Е.А. Трушников

Московский технический университет связи и информатики,
123423, г. Москва, ул. Народного Ополчения, 32, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является анализ и практическая реализация функционала обнаружения фишинговых порталов посредством алгоритмов машинного обучения. **Метод.** Систематизация разрозненных сведений, анализ области, описание имеющихся разработок – основные методики, которые были применены в исследовании. Работа разбита на три больших подблока. В первом проводится анализ понятия машинного обучения, описываются основные способы верной интерпретации вводимых сведений, указываются наиболее ходовые методики, базы данных. Во второй части работы проводится анализ искусственных нейронных сетей. В частности, показываются их подвиды с описанием особенностей реализации, проводится сопоставление с живыми нейронами. В третьей части проводится практическая реализация двух методик и их сравнение, даются рекомендации относительно их использования при обнаружении фишинговых порталов. **Результат.** Проведено исследование методик анализа фишинговых порталов. Анализ показал, что наиболее рационально применять случайный лес, т.к. именно он обеспечивает качество по метрикам precision, recall, F1-score, 98% при значительном количестве введенных параметрических значений. **Вывод.** При реализации различных методологий поиска фишинговых порталов необходимо учитывать их снижение эффективности от вводимых параметров. Для этого важно проводить предварительные тесты. Однако результат тестов можно интерпретировать по-разному. В частности, эффективность методов может быть повышена, если ограничить количество вводимых параметров, но при этом жестко структурированных по одному критерию поиска.

Ключевые слова: фишинг, машинное обучение, нейронные сети, анализ порталов

Для цитирования: Е.А. Трушников. Обнаружение фишинговых порталов посредством алгоритмов машинного обучения. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2024; 51(3):154-162. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-3-154-162

Detection of phishing portals through machine learning algorithms

E.A. Trushnikov

Moscow Technical University of Communication and Informatics,
32 Narodnogo Opolcheniya St., Moscow 123423, Russia

Abstract. Objective Analysis and practical implementation of the phishing portal detection functionality through machine learning algorithms. **Method.** Systematization of disparate information, analysis of the field, description of available developments are the main methods that were used in the study. The work is divided into three large sub-blocks. The first one analyzes the concept of machine learning, describes the main ways to correctly interpret the information entered, indicates the most popular techniques and databases. In the second part of the work, an analysis of artificial neural networks is carried out. In particular, their subspecies are shown with a description of the implementation features, and a comparison with living neurons is carried out. In the third part, the practical implementation of the two techniques and their comparison are carried out, recommendations are given regarding their use in detecting phishing portals. **Result.** The paper investigates the methods of analyzing phishing portals. The analysis showed that it is most rational to use a random forest, because it provides quality according

to the precision, recall, F1-score, 98% metrics with a significant number of parametric values entered. **Conclusions.** When implementing various search methodologies for phishing portals, it is necessary to take into account their decrease in efficiency from the entered parameters. To do this, it is important to conduct preliminary tests. However, the test result can be interpreted in different ways. In particular, the effectiveness of the methods can be improved if you limit the number of input parameters, but at the same time rigidly structured according to one search criterion.

Keywords: phishing, machine learning, neural networks, portal analysis

For citation: E.A. Trushnikov. Detection of phishing portals through machine learning algorithms. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2024; 51(3):154-162. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-3-154-162.

Введение. Искусственный интеллект (ИИ) представляет собой ни что иное, как прогрессивный метод имитации способностей человеческого мозга в программной среде. Одной из важных функций данной системы является способность обучаться, иначе именуемая машинным обучением (МО). К сожалению, в связи с все возрастающими угрозами кибербезопасности (КБ), человек все менее способен защититься от киберугроз (КУ), для того он и стал применять возможности ИИ. Более, того, многие специалисты уже не раз утверждали, что ИИ в некоторых аспектах даже лучше справляется с защитой от КУ, чем люди, т.к. при верном обучении подмечает многие закономерности, которые не заметны с первого взгляда.

Вообще, говоря об уже упоминавшемся МО, нельзя не отметить, что оно основывается на попытке интерпретировать сложные закономерности, которые свойственны конкретному виду КУ. Так как требования к КБ все возрастают, способы применения ИИ также активно развиваются, однако до создания идеальной модели искусственного мозга конечно далеко, в первую очередь из-за особенностей технологического развития компьютерных систем и применимости (для полной аналогизации необходимо использовать не виртуальные, а физические ядра, что крайне удорожает аппаратную часть).

Постановка задачи. Одной из главных угроз современной КБ является фишинг. Как известно, это подставные порталы, максимально копирующие реальные, с одним лишь исключением – направленностью на получение конфиденциальных данных пользователей, их средств [1]. Более того, статистика показывает, что количество подобных интернет ресурсов постоянно растет. Это подтверждает статистика с портала Statista, рис. 1 [2]. Как можно заметить уже в 2022 году было обнаружено огромное количество новых фишинг порталов, дальнейший рост будет значителен.



Рис.1. Статистика фишинг порталов по годам

Fig. 1. Phishing portal statistics by year

С целью максимизации информирования о средствах защиты от фишинговых порталов, доказательства важности применения ИИ для их обнаружения, а также выявления оправданных методик, данная работа и была проведена.

Методы исследования. Машинное обучение, как было отмечено ранее, получает информацию извне. Основные способы наполнения – методы: математической статистики, численные, оптимизации, графов и т.п. Важно также заметить, что по своему характеру, МО – это не только математическая часть, но и уже давно сформировавшаяся инженерная дисциплина, т.е. носящая сугубо практический характер.

Основными методами обучения выступают два классических способа: с учителем, без учителя.

Как несложно догадаться, в первом случае при процессе познания задается пара «прецедент-решение», т.е. вывод на основе полученных данных. Второй случай более сложный, т.к. закладывается логика отсутствия верных известных решений, т.е. алгоритм самостоятельно должен кластеризовать получаемые извне сведения, определить сходные черты и дать ответ [3].

Однако не стоит ограничиваться лишь классическим разбиением, а необходимо описать полную картину. Важно отметить такое МО, как полуконтролируемое, т.е. нечто среднее между озвученными ранее. Такой подход весьма эффективен, так как способен адаптироваться к различным ситуациям, что очень полезно для КБ.

Другой немаловажный подвид – МО с подкреплением. Механизм имеет жесткое предназначение – требования к точности выполнения алгоритма. По сути, в него закладывается логика реализации многоэтапных функциональных действий. Важно понимать, что при всей жесткости контроля, это лишь начальный этап, в основном такие МО сами определяют какие шаги должны выполняться [4].

Отдельную касту занимают методы интеллектуального анализа. Среди них выделяются: линейная и логическая регрессии, решающие деревья, случайный лес, а также опорные вектора. Дадим каждому из них краткую характеристику.

Линейная регрессия выводит гипотетический ответ на базе входящих признаков. Тем самым анализ направлен на попытку предсказания целевого значения вошедших характеристических зависимостей. Как и следует догадаться, идеологически описательный график будет из себя представлять линию, проходящую по усредненному значению случившихся событий, тем самым задавая направленность.

Логическая регрессия, в отличие от предыдущей, уже использует несколько видоизмененный подход – применяется теория вероятности. По сути, более рационально было бы охарактеризовать его как прогнозирующий бинарные зависимости входных признаков, т.к. именно для этого он чаще всего и применяется.

Метод «Решающие деревья» – это ни что иное, как группа МО, основной целью которой служит определение целевой переменной при помощи алгоритмизации действий. Причем в алгоритме все действия относятся к простейшим (предикатам). Данный метод предназначается для решения регрессионных и классификационных задач КБ.

Случайный лес – от части напоминает логическую регрессию, т.к. предназначается для определения классификационных признаков, но в тоже время реализуется кардинально иначе. В его основе лежит понятие случайности признаков. Эти признаки необходимы для построения древа. Так как таких древ будет достаточно много, появляется некорреляционное объединение – лес. Именно оно гарантирует наивысшую точность, чем у отдельно взятого древа. Имея большое разнообразие, выходит ансамбль методов. Среди них производится выбор и те, что имеют наибольшее количество становятся прогнозом.

И последний из названных – метод опорных векторов. По своей сути многофункционален, т.к. предназначается как для анализа регрессий, так и для определения классифицирующих характеристик. Априори он принадлежит к классу обучения с помощью учителя и линейным методам.

Для определения используются несколько объединенных множеств, в которые входят параметры. Эти множества разделены при помощи гиперплоскости, строящейся по некоторым заданным законам. Их логика сводится к попытке максимизации расстоя-

ния до так называемых опорных параметров множеств. Данное действие необходимо для максимизации результирующей классификационной характеристики.

После определения методологий классификаций по принадлежности к оригинальным / фишинг порталам, необходимо акцентировать внимание на базах данных (БД), из которых можно подчерпнуть основные параметры для МО. Среди них наиболее популярными стоит считать:

- 1 Google Dataset Search,
- 2 Visual Data Discovery (VDD),
- 3 Kaggle,
- 4 DataGov.

БД от компании Google не спроста занимает первое место среди перечисленных. Вследствие своей распространенности и известности, она имеет огромный набор сведений, по которым можно проводить МО. Более подробно показано в [5]. Второй представитель БД для МО обладает достаточно большой медиа базой, что крайне положительно сказывается при обучении ИИ на исследование фишинг страниц. Общие сведения по VDD представлены в [6]. Kaggle, в отличие от предыдущих, БД более специализирована именно на МО. Главной особенностью данного портала следует считать возможность живого общения и обмена сведениями со специалистами области КБ, тем самым увеличивая и так немалую БД. Больше сведений показано в [7]. И последний, но не менее значимый, - DataGov. На данном портале сохранены статистические сведения со значимых интернет-ресурсов госструктур. Кроме того, на портале представлены также сведения, явно связанные с работой госаппарата, причем как делового характера, так и опросного [8-9].

Так как дана достаточно подробная характеристика МО, перейдем к его значимому подвиду – нейронным сетям. Поскольку искусственные нейронные сети (ИНС) это алгоритмы МО, наиболее подражающие работе головного мозга, покажем их истинную сущность.

Как известно, нейронная клетка состоит из двух основных отростков – дендритов и аксонов, они являются основополагающими при получении сигналов со стороны синапсиса. Роль же аксонов сводится к выводу информации [3,10]. Аналогично действуют и ИНС, при составлении матмодели, синапсис заменяется весовым коэффициентом [10].

Обучение ИНС проводится определенным алгоритмом действия, включающем следующие четыре этапа:

- 1) Инициализация весовых коэффициентов в рандомном порядке.
- 2) Поиск функционального параметрического значения узловой активации.
- 3) Расчет функционального параметрического значения стоимости.
- 4) Определение частных производных и проведение коррекции весовых коэффициентов [11]

Перейдем далее к рассмотрению архитектурных особенностей ИНС.

Первым подвидом является ИНС прямого распространения. По своей сущности – это многоуровневое матричное распределение входных, исходящих, а также скрытых значений нейронов. Взаимосвязь нейронов происходит с другими столбцами и никогда не пересекаются со своими. Обучение такой ИНС, как правило, происходит при помощи метода обратного распространения ошибок. Наличие скрытых нейронов также имеет огромное значение. Именно они позволяют проводить процесс моделирования [12].

Другим вариантом ИНС можно назвать сеть Хопфилада. Она характеризуется симметричной матрицей связи нейронов. При поступлении сигнала со связанного нейрона, узлы ИНС переходят в статус скрытых, после чего перекалифицируется в исходящий, тем самым описывается процесс МО. Для составления сети Хопфилада необходимо определить весовые коэффициенты, желаемый поведенческий шаблон или шаблоны, если таких несколько. Нередко данную ИНС называют ассоциативной, т.к. она проводит логический анализ по восстановлению матричного поведения [13].

Говоря про виды ИНС, нельзя обойти вниманием сверточные сети. Несмотря на направленность в первую очередь на графические материалы и определение классификационных признаков, она может также применяться для анализа аудиопотока. Данные ИНС парсят все имеющиеся сведения за один прогон [14]. Рассматривая ее с точки зрения входящего матаппарата, сложно отметить присутствие операций свертки, что позволяет не задействовать все части нейронной системы, как это было в классическом варианте [15-16]. Более того, адаптивность данной системы позволяет ей объединяться с иными ИНС, как это отмечено в [17].

И последняя значимая группа ИНС – развертывающиеся сети. Как можно догадаться, принцип их работы противоположен предыдущему варианту. Важно отметить, что вне зависимости от выбора нейронной сети, для запуска работы ИНС, необходимо воздействие, иначе его еще называют активационной функцией. Пример наиболее распространенных показан в [18].

Тем самым, дав описание МО, показав особенности их реализации в виде ИНС. Можно перейти непосредственно к вопросу защиты от фишинговых атак.

Обсуждение результатов. Лучшее средство КБ от фишинга – программа-анализатор. Для ее МО необходимо в обязательном порядке знание верных доменов, а также примеры фишинговых порталов. В качестве основы обучения были приняты методики, показанные в работах [19-21].

Разработка программы поиска фишинговых порталов велась по логике, отображенной в блок-схемном представлении, показанном на рис. 2.



Рис. 2. Блок-схема работы программы
Fig. 2. Block diagram of the program operation

В качестве тестовых, были применены датасеты Чун Лин Тана, при этом специально выбирались 10000 вариационных примеров, которые отдельно классифицировались на фальшивые / оригинальные.

Характеристические признаки подробно показаны в [22].

Для обеспечения работоспособности ИНС были подключены следующие библиотеки из среды программирования Python: Pandas, Numpy, Matplotlib, Seaborn.

Первая библиотека предназначена для управления БД, вторая – для матвычислений, в т.ч. для работ с многомерными матрицами и массивами данных [23]. Matplotlib предназначена для графического отображения, т.е. занято со средой визуализации [24], и, последняя служит для интеграции со структурами данных [25]

Данные для МО в программу были загружены посредством функции `read_csv` – рис. 3(а), а после преобразования, информация стала иметь новый вид – рис. 3(б). Преобразованию было необходимо с целью минимизации затрачиваемых ресурсов памяти (`float64`, `int64` в `float32`, `int32`).

Обучающие наборы были равномерно распределены. В дальнейшем обучающая информация была распределена по классам и решалась задача определения признаков, необходимых для непосредственного МО.

```
<class 'pandas.core.frame.DataFrame'>
RangeIndex: 10000 entries, 0 to 9999
Data columns (total 50 columns):
id 10000 non-null int64
NumDots 10000 non-null int64
SubdomainLevel 10000 non-null int64
PathLevel 10000 non-null int64
UrlLength 10000 non-null int64
NumDash 10000 non-null int64
NumDashInHostname 10000 non-null int64
AtSymbol 10000 non-null int64
TildeSymbol 10000 non-null int64
NumUnderscore 10000 non-null int64
NumPercent 10000 non-null int64
NumQueryComponents 10000 non-null int64
NumAmpersand 10000 non-null int64
NumHash 10000 non-null int64
NumNumericChars 10000 non-null int64
NoHttps 10000 non-null int64
RandomString 10000 non-null int64
IpAddress 10000 non-null int64
DomainInSubdomains 10000 non-null int64
DomainInPaths 10000 non-null int64
HttpsInHostname 10000 non-null int64
HostnameLength 10000 non-null int64
PathLength 10000 non-null int64
QueryLength 10000 non-null int64
DoubleSlashInPath 10000 non-null int64
NumSensitiveWords 10000 non-null int64
EmbeddedBrandName 10000 non-null float64
PctExtHyperlinks 10000 non-null float64
PctExtResourceUris 10000 non-null float64
ExtFavicon 10000 non-null int64
InsecureForms 10000 non-null int64
RelativeFormAction 10000 non-null int64
ExtFormAction 10000 non-null int64
AbnormalFormAction 10000 non-null int64
PctNullSelfRedirectHyperlinks 10000 non-null float64
```

а

```
<class 'pandas.core.frame.DataFrame'>
RangeIndex: 10000 entries, 0 to 9999
Data columns (total 50 columns):
# Column Non-Null Count Dtype
---
0 id 10000 non-null int32
1 NumDots 10000 non-null int32
2 SubdomainLevel 10000 non-null int32
3 PathLevel 10000 non-null int32
4 UrlLength 10000 non-null int32
5 NumDash 10000 non-null int32
6 NumDashInHostname 10000 non-null int32
7 AtSymbol 10000 non-null int32
8 TildeSymbol 10000 non-null int32
9 NumUnderscore 10000 non-null int32
10 NumPercent 10000 non-null int32
11 NumQueryComponents 10000 non-null int32
12 NumAmpersand 10000 non-null int32
13 NumHash 10000 non-null int32
14 NumNumericChars 10000 non-null int32
15 NoHttps 10000 non-null int32
16 RandomString 10000 non-null int32
17 IpAddress 10000 non-null int32
18 DomainInSubdomains 10000 non-null int32
19 DomainInPaths 10000 non-null int32
20 HttpsInHostname 10000 non-null int32
21 HostnameLength 10000 non-null int32
22 PathLength 10000 non-null int32
23 QueryLength 10000 non-null int32
24 DoubleSlashInPath 10000 non-null int32
25 NumSensitiveWords 10000 non-null int32
26 EmbeddedBrandName 10000 non-null float32
27 PctExtHyperlinks 10000 non-null float32
28 PctExtResourceUris 10000 non-null float32
29 ExtFavicon 10000 non-null int32
30 InsecureForms 10000 non-null int32
31 RelativeFormAction 10000 non-null int32
32 ExtFormAction 10000 non-null int32
33 AbnormalFormAction 10000 non-null int32
34 PctNullSelfRedirectHyperlinks 10000 non-null float32
```

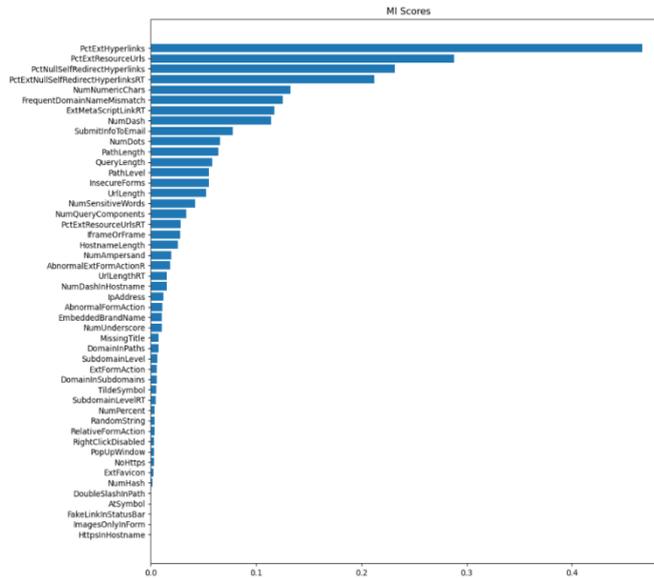
б

Рис. 3. Фрагмент переданной (а), преобразованной (б) информации
 Fig. 3. Fragment of transmitted (a), transformed (b) information

Кроме того, проводился поиск линейных / нелинейных зависимостей между выведенными классами и полученными признаками. При помощи классификатора «mutual_info_classif», описанного в работе [26] были получены результаты, рис. 4(а), и структурированы – рис. 4(б).

```
PctExtHyperlinks 4.686999e-01
PctExtResourceUris 2.968365e-01
PctNullSelfRedirectHyperlinks 2.342147e-01
PctExtNullSelfRedirectHyperlinksRT 2.123850e-01
NumNumericChars 1.326711e-01
FrequentDomainNameMismatch 1.254908e-01
ExtMetaScriptLinkRT 1.175434e-01
NumDash 1.148136e-01
SubmitInfoToEmail 7.802617e-02
NumDots 6.553700e-02
PathLength 6.413269e-02
QueryLength 5.818557e-02
PathLevel 5.543887e-02
InsecureForms 5.508096e-02
UrlLength 5.263855e-02
NumSensitiveWords 4.180522e-02
NumQueryComponents 3.361768e-02
PctExtResourceUrisRT 2.831059e-02
IframeOrFrame 2.805496e-02
HostnameLength 2.564249e-02
NumAmpersand 1.962894e-02
AbnormalFormActionRT 1.816610e-02
UrlLengthRT 1.513853e-02
NumDashInHostname 1.502933e-02
IpAddress 1.207265e-02
AbnormalFormAction 1.118934e-02
EmbeddedBrandName 1.066208e-02
NumUnderscore 1.037366e-02
MissingTitle 7.353661e-03
DomainInPaths 7.003483e-03
SubdomainLevel 6.392610e-03
ExtFormAction 5.613946e-03
DomainInSubdomains 5.497419e-03
TildeSymbol 5.362924e-03
SubdomainLevelRT 4.503644e-03
NumPercent 3.790407e-03
RandomString 3.643235e-03
```

а



б

Рис. 4. Коэффициенты корреляции признаков и их влияние
 Fig. 4. Correlation coefficients of features and their influence

МО проводилось по следующему принципу – 70% набор данных обрабатывался с целью формирования модели, наиболее точно совпадающей с целевым набором. Тестовый набор, 30%, направлен на получение объективной оценки сформированной модели, в него не входили данные из обучающего набора. Далее, зная, что процесс поиска фишинговых порталов в чистом виде относится к классификационному анализу, была проведена оценка по принципам логистической регрессии и случайного леса.

Для этого применялись метрики, определялись классы. Логика полностью совпадает с показанной в [26] (применена библиотека scikit-learn). Метрики, соответственно – precision (точность) и recall (полнота) и F1-score (среднее гармоническое первых двух). Покажем для каждой модели полученные показатели эффективности – рис. 5-6.

Первоначально, на что следует обратить внимание при анализе полученных графиков, – большая эффективность второго метода. Однако, нельзя категорически относиться и к первому подходу, просто необходимо учесть некоторые особенности, которые были выявлены в результате моделирования.

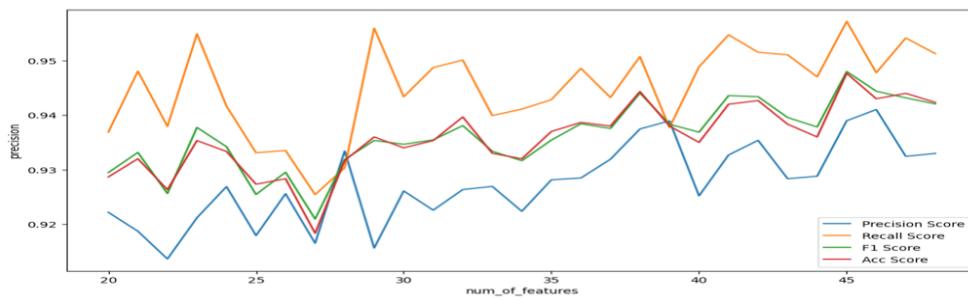


Рис. 5. Показатели логистической регрессии
Fig. 5. Logistic regression indicators

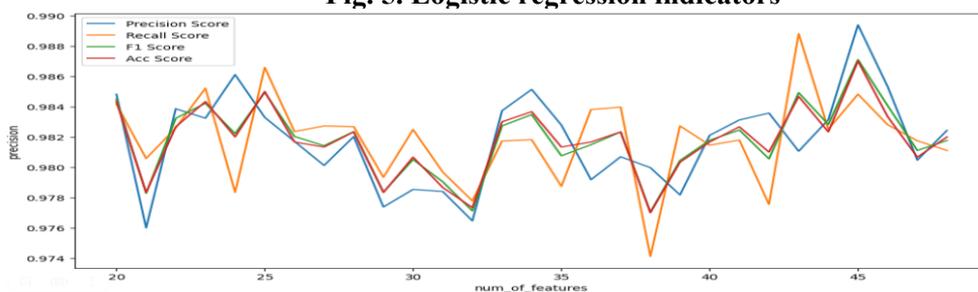


Рис. 6. Показатели случайного леса
Fig. 6. Random Forest Performance

В частности, опыт показал, что при увеличении количества признаков, постепенно теряется параметр качества поиска. Наиболее оптимальное значение находится в районе 39 характеристических параметров, тогда точность падала до 93%. Аналогичное ухудшение, в реальности, видно и в случайном лесе, просто снижение эффективности намного меньше и не так явно выражено. В целом, по проведенному исследованию можно сразу отметить тот факт, что даже при 32 характеристических признаках, расчетное качество модели последнего вида анализатора составляла 98%. Тестовый набор эксперимента показал 100% выявление фишинговых и подставных порталов. Это показано на рис. 7.

	precision	recall	f1-score	support
0	0.98	0.98	0.98	1500
1	0.98	0.98	0.98	1500
accuracy			0.98	3000
macro avg	0.98	0.98	0.98	3000
weighted avg	0.98	0.98	0.98	3000

Рис. 7. Тестирование случайного леса
Fig. 7. Testing Random Forest

Вывод. Проведенное исследование – обзорно-теоретическое. В работе проводился анализ понятия МО, ИИ, нейронных сетей, их видов, а также тестировались некоторые подходы по определению фишинговых порталов. Анализ показал, что имеется достаточно большое количество обобщенных методик обучения ИИ.

Главной же особенностью, на которую следует обратить внимание – это практические способы, к которым относятся линейная и логическая регрессии, решающие деревья, случайный лес, опорные вектора. Именно с помощью отмеченных подходов можно обучить ИИ на поиск фишинговых порталов.

Для реализации ИИ были определены четыре необходимых. Так как имеется несколько видов архитектур, они были также в работе рассмотрены. Это ИНС прямого пространства, сеть Хопфилада, сверточные и развертывающиеся сети.

В части практической реализации была использована программная среда Python. С помощью подключенных баз были загружены 10000 сведений порталам, проводилось распределение по классам и поиск линейных / нелинейных зависимостей. Далее была проведена оценка по принципам логистической регрессии и случайного леса. Опыт показал, что случайный лес более качественен в своем анализе.

Библиографический список:

1. Завьялов А.Н. Интернет-мошенничество (фишинг): проблемы противодействия и предупреждения // *Baikal Research Journal*. - 2022. - Т. 13. - № 2. - С20-26
2. Number of unique phishing sites detected worldwide from 3rd quarter 2013 to 2nd quarter 2023. - URL: <https://www.statista.com/statistics/266155/number-of-phishing-domain-names-worldwide/> (дата обращения 21.02.2024).
3. Платонов А.В. Машинное обучение : учебное пособие для вузов. М.: Издательство Юрайт, 2023. – 85 с.
4. Techtarget. Machine learning. - URL: <https://searchenterpriseai.techtarget.com/definition/machine-learning-ML> (дата обращения 21.12.2022).
5. Google Dataset Search. - URL: <https://datasetsearch.research.google.com/> (дата обращения: 25.12.2022)
6. Visual Data Discovery. - URL: <https://visualdata.io/discovery> (дата обращения: 25.12.2022)
7. Kaggle. - URL: <https://www.kaggle.com/> (дата обращения: 25.12.2022)
8. Портал открытых данных Российской Федерации. – URL: <https://data.gov.ru/opendata> (дата обращения: 25.12.2022)
9. Воронова Л.И., Брус В.Р., Воронов В.И., Баширов А.Н. Предобработка данных для нейросетевого управления: учебное пособие. – М.: МТУСИ, 2021. - 44 с.
10. Потапкин К.О. Искусственные нейронные сети. Нейронная сеть // XLVI Огарёвские чтения : Материалы научной конференции: В 3-х частях, Саранск, 06–13 декабря 2017 года / Ответственный за выпуск П.В. Сенин. Том Часть 1. – Саранск: Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, 2018. – С. 315-320.
11. Воронова Л.И., Воронов В.И. Machine Learning: регрессионные методы интеллектуального анализа данных : учеб. пособ.. М.: Московский технический университет связи и информатики, 2018. - 82 с.
12. The perceptron: a probabilistic model for information storage and organization in the brain. - URL: <https://www.ling.upenn.edu/courses/cogs501/Rosenblatt1958.pdf> (дата обращения: 21.12.2022)
13. Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities. - URL: <https://bi.snu.ac.kr/Courses/g-ai09-2/hopfield82.pdf> (дата обращения: 21.12.2022)
14. Разновидности нейронных сетей. - URL: <https://tproger.ru/translations/neural-network-zoo-1/> (дата обращения: 21.12.2022)
15. Что такое нейронные сети, что они могут. - URL: <https://neural-university.ru/neural-networks-basics> (дата обращения: 20.12.2022)
16. Нейронные сети: распознавание образов и изображений с помощью ИИ. - URL: <https://center2m.ru/ai-recognition> (дата обращения: 20.12.2022)
17. Маркова С.В., Жигалов К.Ю. Применение нейронной сети для создания системы распознавания изображений // *Фундаментальные исследования*. – 2017. – № 8-1. – С. 60-64
18. Как работает нейронная сеть: алгоритмы, обучение, функции активации и потери. - URL: <https://neurohive.io/ru/osnovy-data-science/osnovy-nejronnyh-setej-algoritmy-obuchenie-funkcii-aktivacii-i-poteri/>
19. Xuan C.D, Nguyen H.D., Nikolaevich T.V. Malicious URL detection based on machine learning // *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*. – 2020. – Vol. 11. – No 1. – P.148-153
20. Manjeri A.S., Kaushir R., Ajay M.N.V., Nair P.C. A Machine Learning Approach for Detecting Malicious Websites using URL Features // *3rd International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA)*, 12-14 June 2019. - Coimbatore, India. 555–561 pp.
21. Sarasjati W. et al., Comparative Study of Classification Algorithms for Website Phishing Detection on Multiple Datasets // *International Seminar on Application for Technology of Information and Communication (iSemantic)*. - Semarang, Indonesia, 2022. - 448-452 pp.
22. A new hybrid ensemble feature selection framework for machine learning-based phishing detection system. - URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0020025519300763?via%3Dihub> (дата обращения: 21.12.2022)
23. Учебник по библиотеке NumPy: учитеесь на примерах. - URL: <https://pythonist.ru/uchebnik-po-biblioteke-numpy-uchites-na-primerah/> (дата обращения: 27.12.2022)
24. Руководство по Matplotlib. - URL: https://indico-hlit.jinr.ru/event/151/attachments/340/492/Project_school_Matplotlib_original.pdf (дата обращения: 27.12.2022)
25. Seaborn для визуализации данных в Python. - URL: <https://pythonru.com/biblioteki/seaborn-plot> (дата обращения: 27.12.2022)
26. Scikit-learn Machine Learning in Python. - URL: <https://scikit-learn.org/> (дата обращения: 21.12.2022)

References:

1. Zav'yalov A.N. Internet-moshennichestvo (fishing): problemy protivodejstviya i preduprezhdeniya. *Baikal Research Journal*. 2022;13(2):20-26 (In Russ)
2. Number of unique phishing sites detected worldwide from 3rd quarter 2013 to 2nd quarter 2023. - URL: <https://www.statista.com/statistics/266155/number-of-phishing-domain-names-worldwide/> (data obrashcheniya 21.02.2024).

3. Platonov A.V. Mashinnoe obuchenie : uchebnoe posobie dlya vuzov M.: Izdatel'stvo Yurajt, 2023; 85 (In Russ)
4. Techtargеt. Machine learning. - URL: <https://searchenterpriseai.techtargеt.com/definition/machine-learning-ML> (data obrashcheniya 21.12.2022).
5. Google Dataset Search. - URL: <https://datasetsearch.research.google.com/> (data obrashcheniya: 25.12.2022)
6. Visual Data Discovery. - URL: <https://visualdata.io/discovery> (data obrashcheniya: 25.12.2022)
7. Kaggle. - URL: <https://www.kaggle.com/> (data obrashcheniya: 25.12.2022)
8. Portal otkrytyh dannyh Rossijskoj Federacii. – URL: <https://data.gov.ru/opendata> (data obrashcheniya: 25.12.2022)
9. Voronova L.I., Brus V.R., Voronov V.I., Bashirov A.N. Predobrabotka dannyh dlya nejrosetevogo upravleniya: uchebnoe posobie. M.: MTUSI, 2021; 44. (In Russ)
10. Potapkin K.O. Iskusstvennye nejronnye seti. Nejronnaya set' // XLVI Ogaryovskie chteniya : Materialy nauchnoj konferencii: V 3-h chastyah, Saransk, 06–13 dekabrya 2017 goda / Otvetstvennyj za vypusk P.V. Senin. Tom Chast' 1. – Saransk: Nacional'nyj issledovatel'skij Mordovskij gosudarstvennyj universitet im. N.P. Ogaryova, 2018;315-320. (In Russ)
11. Voronova L.I., Voronov V.I. Machine Learning: regressionnye metody intellektual'nogo analiza dannyh : uchebnoe posobie. – M.: Moskovskij tekhnicheskij universitet svyazi i informatiki, 2018; 82. (In Russ)
12. The perceptron: a probabilistic model for information storage and organization in the brain. - URL: <https://www.ling.upenn.edu/courses/cogs501/Rosenblatt1958.pdf> (data obrashcheniya: 21.12.2022)
13. Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities. - URL: <https://bi.snu.ac.kr/Courses/g-ai09-2/hopfield82.pdf> (data obrashcheniya: 21.12.2022)
14. Raznovidnosti nejronnyh setej. - URL: <https://tproger.ru/translations/neural-network-zoo-1/> (data obrashcheniya: 21.12.2022)
15. Chto takoe nejronnye seti, chto oni mogut. - URL: <https://neural-university.ru/neural-networks-basics> (data obrashcheniya: 20.12.2022)
16. Nejronnnye seti: raspoznavanie obrazov i izobrazhenij c pomoshch'yu II. - URL: <https://center2m.ru/ai-recognition> (data obrashcheniya: 20.12.2022)
17. Markova S.V., Zhigalov K.Yu. Primenenie nejronnoj seti dlya sozdaniya sistemy raspoznavaniya izobrazhenij. *Fundamental'nye issledovaniya*. 2017;8-16 60-64(In Russ)
18. How a neural network works: algorithms, training, activation functions and losses. - URL: <https://neurohive.io/ru/osnovy-data-science/osnovy-nejronnyh-setej-algoritmy-obuchenie-funkcii-aktivacii-i-poteri/>
19. Xuan C.D. Nguyen H.D., Nikolaevich T.V. Malicious URL detection based on machine learning. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*. 2020; 11(1):148-153
20. Manjeri A.S., Kaushir R., Ajay M.N.V., Nair P.C. A Machine Learning Approach for Detecting Malicious Websites using URL Features // 3rd International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA), 12-14 June 2019; 555–561. Coimbatore, India.
21. Sarasjati W. et al., Comparative Study of Classification Algorithms for Website Phishing Detection on Multiple Datasets. *International Seminar on Application for Technology of Information and Communication (iSemantic)*. Semarang, Indonesia, 2022; 448-452.
22. A new hybrid ensemble feature selection framework for machine learning-based phishing detection system. - URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0020025519300763?via%3Dihub> (data obrashcheniya: 21.12.2022)
23. Uchebnyk po biblioteke NumPy: uchites' na primerah. - URL: <https://pythonist.ru/uchebnyk-po-biblioteke-numpy-uchites-na-primerah/> (data obrashcheniya: 27.12.2022)
24. Rukovodstvo po Matplotlib. - URL: https://indico-hlit.jinr.ru/event/151/attachments/340/492/Project_school_Matplotlib_original.pdf (data obrashcheniya: 27.12.2022)
25. Seaborn dlya vizualizacii dannyh v Python. - URL: <https://pythonru.com/biblioteki/seaborn-plot> (data obrashcheniya: 27.12.2022)
26. Scikit-learn Machine Learning in Python. - URL: <https://scikit-learn.org/> (data obrashcheniya: 21.12.2022)

Сведения об авторе:

Трушников Евгений Александрович, магистрант; udonem@mail.ru

Information about the author:

Evgenij A. Trushnikov, Graduate student; udonem@mail.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/ Received 26.02.2024.

Одобрена после рецензирования/ Revised 02.04.2024.

Принята в печать/ Accepted for publication 02.04.2024.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 004.05



DOI: 10.21822/2073-6185-2024-51-3-163-171 Оригинальная статья /Original article

**Методический подход к количественной оценке защищенности
открытых операционных систем АС ОВД**

А.И. Янгиров¹, И.М. Янгиров², Е.А. Рогозин³, С.Б. Ахлюстин⁴

^{1,2} ФКУ «НИЦ «Охрана» Росгвардии,

^{1,2} 111539, г. Москва, Реутовская, 12Б, Россия,

^{3,4} Воронежский институт МВД России,

^{3,4} 394065, г. Воронеж, проспект Патриотов, 53, Россия

Резюме. Цель. В статье рассмотрены положения подхода нечеткой логики применительно к методу количественной оценки защищенности открытых операционных систем (далее – ОС) автоматизированных систем органов внутренних дел Российской Федерации (далее – АС ОВД РФ) с учетом вероятных угроз безопасности и требований стандарта ГОСТ Р ИСО/МЭК 15408 для нивелирования возможных последствий. Информационным сообщением от 18 октября 2016 г., № 240/24/4893 «Об утверждении Требований безопасности информации к операционным системам» ФСТЭК России определено 6 классов защищенности ОС. ОС, соответствующие 1, 2 и 3 классам защиты, применяются в информационных (автоматизированных) системах, в которых обрабатывается информация, содержащая сведения, составляющие государственную тайну, ОС, соответствующие 4, 5 и 6 классам защиты, не предназначены для обработки таких сведений. В представленном исследовании под открытыми ОС АС ОВД РФ понимаются ОС АС ОВД, в которых не обрабатывается информация, содержащая сведения, составляющие государственную тайну.

Метод. Исследование проведено на основе метода анализа возможных угроз безопасности открытых ОС, а также требований стандарта ГОСТ Р ИСО/МЭК 15408, с применением положений нечеткой логики. **Результат.** Результатом работы автоматизированной системы расчета показателя защищенности анализируемой открытой ОС является один из заданных критериев показателей степени защищенности ОС, основанный на положениях нечеткой логики. **Вывод.** Авторами предложен метод оценки защищенности открытых ОС АС ОВД РФ, основанный на положениях нечеткой логики.

Ключевые слова: оценка защищенности, требования безопасности, банк данных угроз безопасности информации, показатель защищенности, критерии защищенности, операционная система, автоматизированная система расчета

Для цитирования: А.И. Янгиров, И.М. Янгиров, Е.А. Рогозин, С.Б. Ахлюстин. Методический подход к количественной оценке защищенности открытых операционных систем АС ОВД. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2024; 51(3):163-171. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-3-163-171

**Methodological approach to quantitative assessment of the security of open operating
systems AS of the Internal Affairs Bodies**

A.I. Yangirov¹, I.M. Yangirov², E.A. Rogozin³, S.B. Akhlyustin⁴

^{1,2} FSI «SRC «OKHRANA» of the Federal service of National Guard of Russia,

^{1,2} 12B Reutovskaya St., Moscow 111539, Russia,

^{3,4} Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia,

^{3,4} 53 Patriots Ave., Voronezh 394065, Russia

Abstract. Objective. The article considers the provisions of the fuzzy logic approach in relation to the method of quantifying the security of open operating systems (OS) of automatized systems of the internal affairs bodies of the Russian Federation (AS of the Russian Federation), taking into account possible security threats and the requirements of the standard GOST

R ISO/IEC 15408 for leveling possible consequences. Information Message № 240/24/4893 dated October 18, 2016 «On Approval of Information Security Requirements for Operating Systems» of the FSTEC of Russia defines 6 OS security classes. Operating systems corresponding to protection classes 1, 2 and 3 are used in information (automated) systems in which information containing information constituting a state secret is processed, operating systems corresponding to protection classes 4, 5 and 6 are not intended for processing such information. In the presented study, the open operating systems of the AS of the Russian Federation are understood as OS AS, in which information containing information constituting a state secret is not processed. **Method.** The study was conducted based on the method of analyzing possible security threats to open operating systems, as well as the requirements of GOST R ISO/IEC 15408 standard, using the provisions of fuzzy logic. **Result.** The result of the automated system for calculating the security index of the analyzed open OS is one of the specified criteria for the degree of security of the OS, based on the provisions of fuzzy logic. **Conclusion.** The authors propose a method for assessing the security of open OS of the AS of the Russian Federation, based on the provisions of fuzzy logic.

Keywords: security assessment, security requirements, data bank of information security threats, security indicator, security criteria, operating system, automated calculation system

For citation: A.I. Yangirov, I.M. Yangirov, E.A. Rogozin, S.B. Akhlyustin. Methodological approach to quantitative assessment of the security of open operating systems AS of the Internal Affairs Bodies. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2024; 51(3):163-171. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-3-163-171.

Введение. Значительная часть задач, с которыми мы сталкиваемся в различных сферах знаний, периодически становятся слишком сложными и многоаспектными из-за большого количества факторов, которые должны быть учтены при достижении определенной научной цели. Для решения подобных задач не всегда применимы исключительно точные и строго определенные модели и алгоритмы. Многие определения и понятия по своей сути обладают нечетким характером из-за индивидуальности человеческих суждений, приближенности мнений и их дальнейшего лексического описания.

Традиционные методы решения научных задач в условиях размытости факторов обычно ограничиваются учетом только незначительных изменений, что не предоставляет возможности для учета различных вариаций в структуре модели.

Для получения оценочных критериев необходимо обладать достаточным количеством информации. Однако в задачах обеспечения безопасности такая информация редко доступна, и поэтому использование только теоретико-вероятностного подхода оказывается затруднительным. Решение таких задач требует гибкого подхода, так как использование моделей и алгоритмов, основанных на бинарной логике (истина или ложь) и точных параметрах, ограничивает возможности получения результатов, которые должны отражать показатели максимально приближенные к реальным.

Для решения подобных задач также зачастую применяются экспертные оценки и другая информация, которая характеризуется субъективной неопределенностью. Наличие многокритериальности в определенных научных задачах также является своего рода элементом субъективной неопределенности, свойственным оценке информационной безопасности. В таких условиях требуется использование соответствующего математического инструментария при решении вопросов оценки информационной защищенности.

На сегодняшний день нечеткая логика, разработанная и представленная в работах Лотфи Аскера Заде, является одним из перспективных направлений научных исследований при анализе, долгосрочном прогнозировании и создании рабочих моделей явлений и процессов, которые сложно формализуемы и трудно поддаются структуризации.

Данный подход отличается от традиционной математической логики тем, что не требует точно сформированных закономерных действий на каждом шаге модели-

рования. Возможности нечеткой логики позволяют перевести процесс моделирования на более высокий уровень, базируясь на минимальном наборе закономерностей.

Постановка задачи. Целью исследования является применение положений подхода нечеткой логики относительно метода количественной оценки защищенности открытых ОС АС ОВД РФ с учетом вероятных угроз безопасности и требований стандарта ГОСТ Р ИСО/МЭК 15408 для нивелирования возможных последствий. Подробное описание рассматриваемой методики расчета оценки защищенности открытых ОС ОВД РФ ранее было представлено в статьях, посвященных разработке автоматизированной системы расчета оценки защищенности ОС на основе анализа требований безопасности.

Методы исследования. Исследования основаны на методах анализа возможных угроз безопасности ОС и требований стандарта ГОСТ Р ИСО/МЭК 15408, количественной оценки требований безопасности ОС АС ОВД РФ с применением положений нечеткой логики.

Основополагающий принцип нечеткой логики заключается в принятии неопределенности как неотъемлемого элемента реального мира. Что отличает нечеткую логику от традиционного бинарного подхода, это - способность работать с понятиями, которые не могут быть определены однозначно как полностью истинные или ложные, а имеют определенную степень вероятности или принадлежности. Применение нечеткой логики находит востребование в различных областях, включая управление процессами, принятие решений и распознавание образов.

Гибкость и способность адаптироваться к неопределенным данным делают нечеткую логику ценным инструментом для решения различных задач. Вместо жесткого деления между истинностью и ложностью, нечеткая логика оперирует понятиями принадлежности и степенями истинности, что позволяет учесть различную степень неопределенности и более точно описать нечеткие понятия, такие как «небольшой» или «быстрый».

В контексте информационной безопасности, данная проблема обладает значительной актуальностью. Оптимальность при принятии решений составляют целостность и безопасность системы, гарантируя достижение максимальной эффективности в обеспечении безопасности, с одной стороны.

С другой же стороны, важно отметить, что оценка и управление информационной безопасностью связаны с наличием случайных факторов и неточностей. В связи с этим математическая модель должна быть построена таким образом, чтобы не только адекватно отражать сущность моделируемых процессов и явлений, но и учитывать условия неопределенности.

В традиционных подходах, случайности в естественных процессах в основном рассматриваются с точки зрения вероятностного значения. Однако такой подход не всегда корректен, на практике неопределенность часто зависит от субъективных оценок. Кроме того, в области обеспечения безопасности, обычно невозможно однозначно определить частоту проявлений отдельных событий.

Применение математического подхода, основанного на нечеткой логике, имеет свои преимущества. Прежде всего, данный подход позволяет описывать условия и решать задачи на достаточно понятном языке. Более того, отмечается его универсальность, и как следствие, высокая эффективность.

Однако необходимо отметить и некоторые недостатки. В базовом наборе правил, составляемых экспертом, могут быть пропущены необходимые элементы или возникнуть противоречия. Кроме того, выбор вида и параметров функций принадлежности, описывающих входные и выходные переменные системы, является субъективным и могут недостаточно точно отражать реальность.

Примечательно, что термин «нечеткий» вызывает некоторое беспокойство у лиц, принимающих решения о выборе методов для осуществления проектов. «Нечеткость» ассоциируется с неуверенностью и возможным недостатком надежности будущей системы.

Следует отметить, что компьютерные модели, основанные на нечеткой логике, достаточно точны и конкретизированы в отношении определенной ситуации, поступающей на вход модели. Такие модели обладают преимуществом в обработке входной информации, имеющей разнородную качественность, при этом обеспечивается более достоверное описание поведения объекта. То есть нечеткие системы позволяют получить единственное решение для определенной ситуации, учитывая общую степень погрешности, приближенности и неполноты входных данных.

Так как математический аппарат нечеткой логики является важным инструментом для анализа слабоструктурированных и сложно формализуемых процессов, к которым, в том числе, возможно отнести задачи обеспечения информационной безопасности, рассмотрим основные принципы и идеи, лежащие в основе теории.

Подход нечеткой логики определяется правилами выполнения операций и преобразований с нечеткими множествами с последующим принятием нечетких решений. Основные правила, используемые в нечеткой логике, включают следующие:

1. Принцип нечеткой импликации: определяет, каким образом нечеткое правило влияет на выводы. Формула импликации используется для определения степени принадлежности выводу на основе степени принадлежности входным переменным.

2. Принцип нечеткого объединения: определяет, как объединить два или более нечетких множества в одно. Это может быть выполнено, например, через операцию объединения (логическое «или») или через алгоритмы агрегации, такие как максимум или среднее значение.

3. Принцип нечеткого пересечения: определяет, как выполнить операцию пересечения двух или более нечетких множеств. Это может быть выполнено, например, через операцию пересечения (логическое «и») или через алгоритмы, такие как минимум или произведение.

4. Принцип нечеткого вычисления: определяет, как вычислить степень принадлежности результату на основе степени принадлежности входных переменных и правил нечеткой логики.

5. Принцип агрегации выводов: определяет, как объединить несколько выводов для получения окончательного решения. Это может быть выполнено, например, через операцию объединения (логическое «и») или через алгоритмы агрегации, такие как максимум или среднее значение.

6. Принцип дефаззификации: определяет, как преобразовать нечеткое множество в определенное значение. Различные методы могут использоваться для получения точечного значения, такие как центр тяжести, средневзвешенное значение или другие алгоритмы.

Все эти правила и принципы помогают в исполнении операций и принятии нечетких решений на основе нечетких данных для достижения более гибкого и адаптивного подхода в логических вычислениях.

Правила нечеткой логики позволяют работать с размытыми и неопределенными понятиями и данными. В этой теории также могут использоваться нечеткие множества, которые содержат элементы, принадлежность которых является частичной. Для описания нечетких множеств используются функции принадлежности, которые определяют, насколько элементы относятся к этим множествам. Значения функции принадлежности варьируются от 0 до 1, где 0 – означает полное отсутствие принадлежности, а 1 – полную принадлежность.

На практике, функции принадлежности обычно представляются графически с помощью кривых или графиков. Используются различные формы функций, такие как треугольные, гауссовы или трапециевидные, возможно комбинирование нескольких типов на одном графике. Основным принципом заключается в том, что, чем выше значение функции принадлежности, тем больше элемент относится к определенному множеству. При построении нечетких множеств выбирают форму функции принадлежности (исходя из

исходных данных), определяют ее параметры, после чего отмечают значения, чтобы они наилучшим образом отражали интересующие нас характеристики.

Для более ясного понимания принципов работы нечеткой логики можно рассмотреть простейший пример. Рассмотрим такое нечеткое понятие как «температура чая». Чай может быть различной температуры, следовательно, возможно введение нечеткого терм-множества, состоящего из следующих основных переменных: «холодный», «теплый», «горячий». Определим, что температура рассматривается от 0 до 100 °С, так как при 0 °С вода становится льдом, а при 100 °С начинается процесс испарения. Таким образом, получим область рассуждений в виде $T = [0; 100]$. Восприятие температуры у людей может различаться. Например, один человек может охарактеризовать температуру чая термином «холодный», если она ниже комнатной температуры, в то время как другие люди будут считать такую температуру «теплой» или даже «горячей». Допустим, что для всех чай является «холодным», если его температура находится в пределах от 0°С до 20°С. Более высокие температуры люди из выборки определяют по-разному, в зависимости от своих предпочтений, однако для всех людей чай считается «теплым» при $T = [40; 60]$ °С. Горячим обычно признается чай от 80 °С и выше.

Функция принадлежности для понятия «холодный чай» может быть построена таким образом, чтобы отражать различные предпочтения или базироваться на статистических данных о температурных предпочтениях широкой аудитории.

Так, при температурах от 0 до 20 °С возможно однозначно интерпретировать чай «холодным» и принадлежность его к данному множеству будет равна 1. По мере удаления от этой точки значение функции будет уменьшаться, указывая на уменьшение принадлежности к понятию. Функция принадлежности – $Q(T)$ принимает значения от 0 до 1, где 0 – означает полное отсутствие принадлежности, а 1 – полную принадлежность.

Обобщив вышесказанное, можем представить функцию принадлежности температуры чая к множеству «холодный» в трапецидальном виде. Аналогичным образом можно построить функции принадлежности к нечетким переменным «теплый», «горячий» (рис. 1).

$$Q_{\text{хол}}(T^{\circ}\text{C}) = \begin{cases} 1, & T \in [0; 20]; \\ 1 - \frac{T - 20}{20}, & T \in (20; 40); \\ 0, & \text{в остальных случаях} \end{cases}$$

$$Q_{\text{теп}}(T^{\circ}\text{C}) = \begin{cases} 1 - \frac{40 - T}{20}, & T \in (20; 40); \\ 1, & T \in [40; 60]; \\ 1 - \frac{T - 60}{20}, & T \in (60; 80); \\ 0, & \text{в остальных случаях} \end{cases}$$

$$Q_{\text{гор}}(T^{\circ}\text{C}) = \begin{cases} 1 - \frac{80 - T}{20}, & T \in (60; 80); \\ 1, & T \in [80; 100]; \\ 0, & \text{в остальных случаях} \end{cases}$$

Рис. 1. Функции принадлежности к нечетким переменным «холодный», «теплый», «горячий»

Fig. 1. Membership functions for fuzzy variables “cold”, “warm”, “hot”

На рис. 1 $Q_{\text{хол}}(T^{\circ}\text{C})$ – принадлежность к множеству «холодный», $Q_{\text{теп}}(T^{\circ}\text{C})$ – принадлежность к множеству «теплый», $Q_{\text{гор}}(T^{\circ}\text{C})$ – принадлежность к множеству «горячий», T – температура.

Отобразим полученные значения на графике функции соответствия диапазонов принадлежности температуры (рис. 2). Множество «холодный» (от 0 до 40) обозначено синим цветом, множество «теплый» (от 20 до 80) обозначено желтым цветом, множество «горячий» (от 60 до 100) обозначено красным цветом.

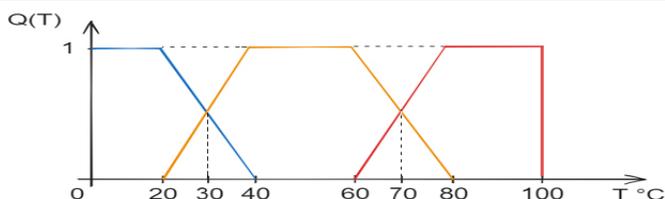


Рис. 2. График функции соответствия диапазонов принадлежности температуры
Fig. 2. Graph of the correspondence function of temperature membership ranges

Учитывая пересечения областей получаем, что к множеству «холодный» температура относится от 0 °С (включительно) до 30 °С (включительно), к множеству «теплый» температура относится от 30 до 70 °С (включительно), к множеству горячий температура относится от 70 до 100 °С (включительно).

Обсуждение результатов. В сфере информационной безопасности данный подход также может обеспечить возможность оценки различных критериев. Оптимальность при принятии решений является одним из ключевых аспектов обеспечения целостности и безопасности ОС, позволяя достигать максимальной эффективности в обеспечении защищенности. Вместе с тем, при обеспечении защиты ОС также необходимо учитывать наличие возможных случайных факторов и неточностей. Поэтому математическая модель должна быть построена таким образом, чтобы достаточно точно отражать сущность моделируемых процессов и явлений, учитывая при этом условия неопределенности.

В ранее опубликованных исследованиях, посвященных разработке автоматизированной системы для оценки степени защищенности открытых ОС ОВД РФ, представлена взаимозависимая связь между определенными критериями, которые определяют уровень защищенности ОС [1-4]. Исследования основывались на анализе требований безопасности в соответствии с ГОСТ Р ИСО/МЭК 15408 и потенциальных угроз.

В результате работы программы выводится лингвистический показатель защищенности, который зависит от количественной оценки требований безопасности и определяет уровень защищенности: «низкий», «средний» или «высокий». Для представленного программного обеспечения и реализованного в нем подхода возможно применение положений нечеткой логики, которые могли бы позволить учесть неопределенность и субъективность предложенных лингвистических показателей, а также другие обстоятельства, возникающие при эксплуатации ОС, оценке ОС, некорректной настройке ОС и тому подобном.

На данный момент в банке данных угроз безопасности информации, разработанном ФАУ «ГНИИИ ПТЗИ ФСТЭК России», имеется 222 угрозы, каждая из которых имеет определенное количество последствий [6]. При реализации какой-либо угрозы выделены следующие типы последствий: «нарушение конфиденциальности», «нарушение целостности» и «нарушение доступности». Представленные последствия проявляются в зависимости от типа реализованной угрозы. В зависимости от потенциала угрозы ОС может проявиться от 1 до 3 последствий, что позволяет распределить угрозы с учетом количества этих последствий. При анализе угроз безопасности можно выделить следующие категории, основанные на количестве последствий:

- 1) угрозы, имеющие 1 последствие (88 шт.);
- 2) угрозы, имеющие 2 последствия (52 шт.);
- 3) угрозы, имеющие 3 последствия (82 шт.).

Для обеспечения функционирования нечеткой логики вводятся определенные правила, которые позволяют классифицировать угрозы в соответствии с их потенциалом. Применительно к разработанному программному обеспечению введем следующие правила:

- 1) Если будут нивелированы угрозы, которые имеют наибольшее количество последствий, систему можно считать однозначно минимально защищенной (246 шт.);
- 2) Если будут нивелированы угрозы, которые имеют 2 и 3 последствия, систему можно считать средней по уровню защищенности (350 шт.);

3) Если будут нивелированы угрозы, имеющие 1, 2 и 3 последствия, систему можно считать максимально защищенной (438 шт).

4) Поскольку семейства функциональных требований, требований доверия и других критериев сложно классифицировать по уровню защиты от конкретных последствий, предполагается, что они нивелируются равномерно (отсутствие определенного требования не позволяет однозначно сказать, в каком виде выразится уязвимость ОС, так как зависимости требований могут быть многогранны);

5) В методе оценки защищенности открытых ОС АС ОВД применяется эталонный профиль защиты (наиболее защищенный профиль защиты, предназначенный для применения на автоматизированных рабочих местах систем, находящийся в открытом доступе на сайте ФАУ «ГНИИИ ПТЗИ ФСТЭК России», разработанный в соответствии с ГОСТ Р ИСО/МЭК 15408), при реализации всех требований защиты указанного профиля система будет иметь максимальную защищенность.

В соответствии с установленными правилами, определим следующие степени защищенности ОС: «уязвимая система», «минимально защищенная система», «средне защищенная система», «максимально защищенная система». Исходя из изложенных выше данных, приходим к выводу, что наиболее подходящим вариантом функции принадлежности будет треугольная форма. Учитывая рассмотренные ранее данные и введенные правила сформируем функции принадлежности защищенности открытых ОС (рис. 3).

$$Q_y(N_n) = \begin{cases} 1 - \frac{N_n}{246}, N_n \in [0; 246); \\ 0, \text{ в остальных случаях.} \end{cases}$$

$$Q_{\min}(N_n) = \begin{cases} 1 - \frac{246 - N_n}{246}, N_n \in [0; 246); \\ 1 - \frac{N_n - 246}{104}, N_n \in [246; 350); \\ 0, \text{ в остальных случаях.} \end{cases}$$

$$Q_{\text{cp}}(N_n) = \begin{cases} 1 - \frac{350 - N_n}{104}, N_n \in [246; 350); \\ 1 - \frac{N_n - 350}{88}, N_n \in [350; 438); \\ 0, \text{ в остальных случаях.} \end{cases}$$

$$Q_{\max}(N_n) = \begin{cases} 1 - \frac{438 - N_n}{88}, N_n \in (350; 438]; \\ 0, \text{ в остальных случаях.} \end{cases}$$

Рис. 3. Функции принадлежности показателей защищенности открытых ОС

Fig. 3. Membership functions of security indicators of open OS

На рис. 3 $Q_y(N_n)$ – принадлежность к множеству «уязвимая система», $Q_{\min}(N_n)$ – принадлежность к множеству «минимально защищенная система», $Q_{\text{cp}}(N_n)$ – принадлежность к множеству «средне защищенная система», $Q_{\max}(N_n)$ – принадлежность к множеству «максимально защищенная система», N_n – количество последствий.

На основании функций принадлежности сформируем график функции соответствия диапазонов принадлежности степени защищенности открытых ОС (рис. 4).

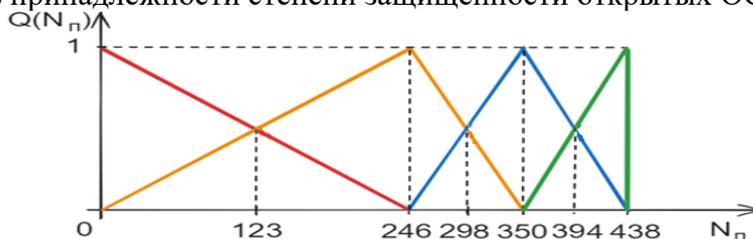


Рис. 4. График функции соответствия диапазонов принадлежности степени защищенности открытых ОС

Fig. 4. Graph of the correspondence function of the ranges of belonging to the degree of protection of open OS

На рис. 4 область принадлежности к множеству «уязвимая система» обозначена красным цветом (от 0 до 246), область принадлежности к множеству «минимально защищенная система» обозначена оранжевым цветом (от 0 до 350), область принадлежности

к множеству «средне защищенная система» обозначена синим цветом (от 246 до 438), область принадлежности к множеству «максимально защищенная система» обозначена зеленым цветом (от 350 до 438). Учитывая пересечения областей принадлежности, степени защищенности открытых ОС предполагают следующие диапазоны: «уязвимая система» – от 0 до 123 (включительно), «минимально защищенная система» – от 123 до 298 (включительно), «средне защищенная система» – от 298 до 394 (включительно), «максимально защищенная система» – от 394 до 438 (включительно).

При рассмотрении данного подхода в контексте разработанного программного обеспечения, стоит отметить, что при использовании эталонного профиля защиты предполагается, что реализация всех его требований (полная реализация на 100%) нивелирует все возможные последствия угроз (в данном случае их число составляет 438). Исходя из этого, выборка угроз напрямую влияет на процент защищенности системы.

Проведем аналогию с другими показателями: если нивелировано до 123 последствий угроз (задействовано примерно до 28% требований) – система может считаться уязвимой, при нивелировании от 123 до 298 последствий угроз (задействовании примерно от 28 до 69% требований) – система может считаться минимально защищенной, при нивелировании от 298 до 394 последствий угроз (задействовании примерно от 69 до 90 % требований) – система может считаться средней защищенности, при нивелировании от 394 до 438 последствий угроз (задействовании примерно от 90 до 100 % требований) – система может считаться максимально защищенной.

Вместе с тем эти данные касаются исключительно случая, когда задействованы одновременно все угрозы и реализуется максимальное количество требований. В случае противодействия меньшему количеству угроз график будет сужаться в левую сторону и значения соответствия параметров защищенности будут изменяться в меньшую сторону.

Вывод. Таким образом, нечеткая логика позволяет учесть неопределенности при оценке степени защищенности открытых ОС. Это важное преимущество, которое делает нечеткую логику востребованной в различных сферах, включая управление, прогнозирование, искусственный интеллект и многие другие. Каждая отдельная система имеет свои особенности, и использование представленного подхода позволяет точнее рассматривать необходимые аспекты, учитывая нюансы и потенциальные риски.

Библиографический список:

1. Алгоритмизация расчета оценки защищенности операционных систем АИС ОВД, разработанного на основе анализа требований безопасности ГОСТ Р ИСО/МЭК 15408 и возможных угроз / А.И. Янгиров, Е.А. Рогозин, О.И. Бокова, С.Б. Ахлюстин // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2023. – Т. 50, № 3. – С. 167-171. – DOI 10.21822/2073-6185-2023-50-3-167-171. – EDN QIOPOE.
2. К вопросу оценки защищенности операционных систем, использующихся в автоматизированных информационных системах органов внутренних дел / А.И. Янгиров // Охрана, безопасность, связь. – 2023. – № 8-3. – С. 83-90. – EDN SLCGLG.
3. Расчет оценки защищенности открытых операционных систем на основе анализа требований безопасности по ГОСТ р ИСО/МЭК 15408 / А.И. Янгиров, Е.А. Рогозин // Вопросы обеспечения безопасности в киберпространстве: Материалы Всероссийской научно-технической конференции, Махачкала, 16.12.2022. – Махачкала: Дагестанский государственный технический университет, 2022. – С. 243-248. – EDN EDHNEY.
4. Разработка автоматизированной системы расчета оценки защищенности операционных систем информационных систем на основе анализа требований безопасности / А.И. Янгиров, Е.А. Рогозин, Е.Ю. Никулина, А.В. Калач // Вестник Воронежского института ФСИН России. – 2022. – № 4. – С. 182-188. – EDN BNBXNZ.
5. Информационное сообщение от 18 октября 2016 г. № 240/24/4893 «Об утверждении Требований безопасности информации к операционным системам» ФСТЭК России – [Электронный ресурс] – Режим доступа. – URL: <https://fstec.ru/dokumenty/vse-dokumenty/informatsionnye-i-analiticheskie-materialy/informatsionnoe-soobshchenie-fstek-rossii-ot-18-oktyabrya-2016-g-n-240-24-4893> (Дата обращения: 01.02.2024).
6. Банк данных угроз безопасности информации – [Электронный ресурс] – Режим доступа. – URL: <https://bdu.fstec.ru/> (Дата обращения: 01.02.2024).

7. ГОСТ Р ИСО/МЭК 15408-2-2013. Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Критерии оценки безопасности информационных технологий. Часть 2. Функциональные компоненты безопасности [Электронный ресурс] – Режим доступа. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200105710> (Дата обращения: 27.12.2023).
8. ГОСТ Р ИСО/МЭК 15408-3-2013. Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Критерии оценки безопасности информационных технологий. Часть 3. Требования доверия к безопасности [Электронный ресурс] – Режим доступа. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200105711> (Дата обращения: 27.12.2023).

References:

1. Algorithm for calculating the security assessment of operating systems of the AIS OVD, developed on the basis of the analysis of the security requirements of GOST R ISO / IEC 15408 and possible threats / A.I. Yangirov, E.A. Rogozin, O.I. Bokova, S.B. Akhlyustin. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2023;50(3):167-171. - DOI 10.21822/2073-6185-2023-50-3-167-171. - EDN QIOPOE. (In Russ)
2. On the issue of assessing the security of operating systems used in automated information systems of internal affairs bodies. A.I. Yangirov. *Security, safety, communication*. 2023; 8-3:83-90. – EDN SLCGLG. (In Russ)
3. Calculation of the security assessment of open operating systems based on the analysis of security requirements according to GOST r ISO/IEC 15408 / A.I. Yangirov, E.A. Rogozin // Issues of ensuring security in cyberspace: Proceedings of the All-Russian scientific and technical conference, Makhachkala, 12/16/2022. – Makhachkala: Dagestan State Technical University, 2022;243-248. – EDN EDHHEY. (In Russ)
4. Development of an automated system for calculating the security assessment of operating systems of information systems based on the analysis of security requirements. A.I. Yangirov, E.A. Rogozin, E.Yu. Nikulina, A.V. Kalach . *Bulletin of the Voronezh Institute of the Federal Penitentiary Service of Russia*. 2022; 4:182-188. – EDN BNBXNZ. (In Russ)
5. Information message of October 18, 2016 No. 240/24/4893 "On approval of the Information Security Requirements for Operating Systems" of the FSTEC of Russia - [Electronic resource] - Access mode. - URL: <https://fstec.ru/dokumenty/vse-dokumenty/informatsionnye-i-analiticheskie-materialy/informatsionnoe-soobshchenie-fstek-rossii-ot-18-oktyabrya-2016-g-n-240-24-4893> (Accessed: 01.02.2024). (In Russ)
6. Information Security Threat Database - [Electronic resource] - Access mode. - URL: <https://bdu.fstec.ru/> (Accessed: 01.02.2024). (In Russ)
7. GOST R ISO/IEC 15408-2-2013. Information technology. Security methods and tools. Information technology security evaluation criteria. Part 2. Security functional components [Electronic resource] – Access mode. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200105710> (Accessed: 27.12.2023). (In Russ)
8. GOST R ISO/IEC 15408-3-2013. Information technology. Security methods and tools. Information technology security evaluation criteria. Part 3. Security assurance requirements [Electronic resource] – Access mode. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200105711> (Accessed: 27.12.2023). (In Russ)

Сведения об авторах:

Янгиров Адиль Илдарович, начальник отделения лабораторных исследований и испытаний; adil-yan@yandex.ru

Янгиров Илдар Мухаматович, научный сотрудник отдела развития средств обнаружений; YIMufa@yandex.ru

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

Ахлюстин Сергей Борисович, кандидат технических наук, начальник кафедры тактико-специальной подготовки; serg7676@yandex.ru

Information about authors:

Adil I. Yangirov, Head of the Laboratory Research and Testing Department; adil-yan@yandex.ru

Илдар М. Янгиров, Исследователь в отделе разработки средств обнаружения; YIMufa@yandex.ru
Evgeny A. Rogozin, Dr. Sci. (Eng), Prof.; Prof., Department of Automated Information Systems of the Department of Internal Affairs; evgenirogozin@yandex.ru

Sergey B. Akhlyustin, Cand. Sci. (Eng), Head of the Department of Tactical and Special Training; serg7676@yandex.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 15.06.2024.

Одобрена после рецензирования/ Revised 10.07.2024.

Принята в печать/Accepted for publication 10.07.2024.

Сравнительный анализ методик акустического расчета дросселирующих устройств
Д.В. Абрамкина¹, А.О. Иванова¹, Д.Ф. Карпов², М.В. Павлов², Х.М. Вафаева³

¹Московский государственный строительный университет,

¹129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26, Россия,

²Вологодский государственный университет,

²160000, г. Вологда, ул. Ленина, 15, Россия,

³Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,

³195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29 литера Б, Россия

Резюме. Цель. Выявление повышенных шумов от вентиляционных систем в период эксплуатации зданий приводит к необходимости проведения сложных и дорогостоящих операций по обнаружению и устранению источников шума, проведению демонтажных работ, установке дополнительных шумоглушителей или замене вентиляционного оборудования. Проведение корректных акустических расчетов является одной из важнейших задач при проектировании объектов различного назначения. **Метод.** В статье представлен анализ отечественных и зарубежных методик по определению шума, генерируемым дросселирующим устройством. Оценка точности результатов расчетов проводилась с помощью их сравнения с данными натурных испытаний. **Результат.** Было выявлено резкое возрастание уровня звуковой мощности в дросселирующем устройстве при увеличении угла поворота створки более 60 градусов, что оказывает значительное влияние на акустическую обстановку помещений и приводит к превышению нормируемых уровней шумового воздействия. **Вывод.** Проведенный сравнительный анализ существующих методик расчета позволил выявить, что отечественная методика расчета дает требуемый запас по уровню звуковой мощности дросселирующего устройства по всем октавным полосам. К недостаткам зарубежных методик расчета можно также отнести отсутствие учета акустического влияния фасонных элементов и присоединения воздуховода к дросселю, что приводит к необходимости дальнейшей верификации методик расчета для сложных систем.

Ключевые слова: шум, шумовые характеристики, вентиляционная система, дросселирующие устройства, уровень звуковой мощности

Для цитирования: Д.В. Абрамкина, А.О. Иванова, Д.Ф. Карпов, М.В. Павлов, Х.М. Вафаева. Сравнительный анализ методик акустического расчета дросселирующих устройств. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2024; 51(3):172-179. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-3-172-179

Comparative analysis of acoustic calculation methods for throttling devices
D.V. Abramkina¹, A.O. Ivanova¹, D.F. Karpov², M.V. Pavlov², Kh.M. Vafaeva³

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

Abstract. Objective. The identification of increased noise levels from ventilation systems during the operation of buildings necessitates complex and costly procedures to detect and eliminate noise sources, conduct dismantling work, install additional silencers, or replace ventilation equipment. Therefore, accurate acoustic calculations are one of the most critical tasks in

the design of various facilities. **Method.** This article presents an analysis of domestic and international methods for determining the noise generated by throttling devices. The accuracy of the calculation results was evaluated by comparing them with data from field tests. **Result.** A sharp increase in sound power level within the throttling device was observed when the blade angle exceeded 60 degrees, significantly impacting the acoustic environment of the premises and leading to an exceedance of regulated noise levels. **Conclusion.** The conducted comparative analysis of existing calculation methods revealed that the domestic calculation method provides the required margin for the sound power level of the throttling device across all octave bands. A notable drawback of international calculation methods is the lack of consideration for the acoustic impact of duct fittings and the connection of the duct to the throttle, which underscores the need for further validation of these methods for complex systems.

Keywords: noise, noise characteristics, ventilation system, throttling devices, sound power level

For citation: D.V. Abramkina, A.O. Ivanova, D.F. Karpov, M.V. Pavlov, Kh.M. Vafaeva. Comparative analysis of acoustic calculation methods for throttling devices. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2024; 51(3):172-179. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-3-172-179

Введение. Проведение акустических расчетов вентиляционных систем сопровождается рядом трудностей. Одной из наиболее распространенных ошибок является некорректное выявление источников шума. Так, зачастую проектировщики учитывают только шум, генерируемый вентилятором, оставляя без должного внимания работу регулирующих устройств и влияние фасонных элементов [1].

Поскольку установка дросселирующих клапанов производится непосредственно на ответвлениях вентиляционных каналов, они являются критически важными компонентами при оценке акустической обстановки в помещении. Постоянный шум от инженерных систем в здании оказывает негативное воздействие на здоровье, работоспособность и психическое состояние человека, особенно в ночное время суток [2-3]. Низкочастотные вибрации, распространяющиеся по ограждающим конструкциям здания при работе вентиляторов близки к резонансным частотам внутреннего человеческого тела, что приводит к возникновению целого ряда болезненных синдромов [4-5].

При прохождении воздушного потока через створку дросселирующего устройства формируются два источника шума: задняя кромка, создающая широкополосный шум, и вихревая зона, формирующая узкополосный шум с экстремумом в одной из октавных частот.

Уровень звуковой мощности дросселирующего устройства зависит от скорости потока воздуха и потерь давления, возникающей на клапане [6-7]. Отсутствие коэффициентов местного сопротивления (КМС) при различных углах открытия дросселирующих устройств в каталогах фирм-производителей затрудняет точный расчет и оценку работы клапанов в реальных условиях.

В основном, данные по шумовым характеристикам либо отсутствуют полностью, либо указан только скорректированный по шкале А уровень звуковой мощности, дБ(А), что приводит к невозможности проведения квалифицированного акустического расчета [8]. Шум от механических вентиляционных систем может стать серьезным ограничением по их применению в жилищном строительстве [9-11].

Постановка задачи. Объектом исследования являются одностворчатые дросселирующие клапаны систем вентиляции. Предмет исследования – шум, генерируемый регулирующими устройствами в вентиляционной сети.

Целью исследования является проведение сравнительного анализа существующих методик по расчету уровней звуковой мощности, излучаемой в воздуховод дроссель-клапанами систем вентиляции.

Методы исследования. Методика 1. Для расчета звуковой мощности, дБ, излучаемой в воздуховод по октавным уровням различными регулирующими устройствами, используется следующая формула [12]:

$$L_{\text{рокт}} = 60lgv + 20lg\zeta + 10lgF + 10lg\varphi + \Delta L_2 - \Delta L_4 + \Delta L_{\text{вз}} + 36, \quad (1)$$

где: v – скорость потока, набегающего на регулирующее устройство, м/с; ζ – коэффициент местного сопротивления регулирующего устройства, отнесенный к скорости v ; F – площадь поперечного сечения канала, м²; φ – критерий подобия, определяющийся в зависимости от коэффициента местного сопротивления регулирующего устройства; ΔL_2 – поправка, дБ, на акустическое влияние присоединения воздуховода к дросселю, $\Delta L_{\text{вз}}$ – поправка на взаимное расположение фасонных элементов, дБ; ΔL_4 – частотная поправка, дБ.

Поправка на взаимное расположение фасонных элементов $\Delta L_{\text{вз}}$ позволяет учесть турбулизацию воздушного потока в вентиляционном канале при прохождении им местных сопротивлений. В методике также указано, что при расположении фасонных элементов перед дросселирующим устройством на расстоянии, меньшем, чем четыре гидравлических диаметра, уровень звуковой мощности увеличивается на 4 дБ.

Одной из причин повышенного уровня шума в вентиляционных системах является наличие вихревых зон, формирующихся за регулирующими устройствами [13-14]. На практике возникает ситуация, когда дроссель-клапаны устанавливаются в непосредственной близости от воздухораспределительных решеток и диффузоров, что приводит к размыканию вихревой зоны и формированию неблагоприятной акустической обстановки в помещении.

При расчете частотной поправки ΔL_4 используется коэффициент a , зависящий от конструкции регулирующего устройства. В справочных материалах имеются данные только для шиберов и дроссельного клапана. В случае применения ирисовой диафрагмы и соплового регулятора необходимо учитывать степень открытия лепесткового затвора, а также угол расположения створок, но информация по коэффициенту a для рассматриваемых случаев отсутствует. В настоящее время также используются мембранные клапаны постоянного расхода воздуха, для которых точное определение частотной поправки не является возможным.

Методика 2. Уровень шума, генерируемый дросселирующим устройством, можно рассчитать по методике, представленной М. Лонгом [15]:

$$L_{\text{рокт}}(f_0) = K_D + 10lg(f_0/63) + 50lg(U_C) + 10lg(S) + 10lg(D_H) + C_D \quad (2)$$

где: $L_{\text{рокт}}$ – уровень звуковой мощности в октавной полосе, дБ; f_0 – средняя частота октавной полосы, Гц; K_D – характеристика спектра клапана, зависящая от потерь давления и числа Струхала; U_C – скорость потока в суженной части канала, фут/с; S – площадь поперечного сечения ответвления канала, фут²; D_H – отношение высоты канала к оси заклонки, фут; C_D – коэффициент местного сопротивления.

Коэффициент закрытия одностворчатого дроссель-клапана определяется по формуле:

$$\begin{cases} B = \frac{\sqrt{C_D} - 1}{C_D - 1}, C_D < 4 \\ B = 0.68C^{0.15} - 0.22, C_D > 4 \end{cases} \quad (3)$$

Скорость потока в суженной части канала, фут/с:

$$U_C = \frac{Q}{60SB}, \quad (4)$$

где: Q – объемный расход воздуха, фут³/мин.

Для определения характеристики спектра клапана необходимо найти число Струхала:

$$S_t = f_0 D / U_C \quad (5)$$

$$(6)$$

$$\begin{cases} K_D = -36,6 - 10,7 \lg(S_t), S_t \leq 25 \\ K_D = -1,1 - 35,9 \lg(S_t), S_t > 25 \end{cases}$$

В данной методике не производится учет особенностей подключения воздухопроводов к дросселирующим устройствам.

Методика 3 подробно описана в [16], где для расчета звуковой мощности регулирующих устройств используется следующее выражение:

$$PWL_{f_0} = K + 10 \log(f_0) + 50 \log(U) + 10 \log(S) + 10 \log(D) + \text{Special Parameters} \quad (7)$$

где: f_0 – средняя частота октавной полосы, Гц; K – характеристика спектра клапана, основанная на числе Струхала; U – скорость потока в канале, м/с; S – площадь поперечного сечения канала, м²; D – отношение высоты канала к оси заслонки, м; *Special Parameter* – параметр, учитывающий потери давления на регулирующем устройстве, для дроссель-клапана принимается равным 18 дБ.

В данной методике определение характера спектра клапана производится с помощью графиков и аналитических зависимостей:

$$\begin{cases} K_D = 5 - 10,7 \lg(S_t), S_t \leq 25 \\ K_D = 40,2 - 35,9 \lg(S_t), S_t > 25 \end{cases} \quad (8)$$

Обсуждение результатов. На начальном этапе были произведены расчеты уровней звуковой мощности дроссельного клапана, установленного вблизи фасонного элемента (отвода) выбранного участка, при различных углах открытия створки (от 20° до 70°). График ниже отображает октавные уровни звуковой мощности, излучаемой в воздухопровод и генерируемой дроссельным клапаном. Красные линии указывают на значения, когда клапан размещен непосредственно у фасонного элемента, а синие — на значения при удалении клапана от него. Предполагается, что скорость на регулирующем устройстве равна скорости воздушного потока в канале. Расчет производится для системы вентиляции с поквартирными спутниками круглого сечения с диаметром 125 мм, оборудованной в жилом здании. На каждом спутнике устанавливаются дроссель-клапаны. Расход воздуха в спутнике составил 60 м³/ч, средняя скорость потока воздуха 1,4 м/с.

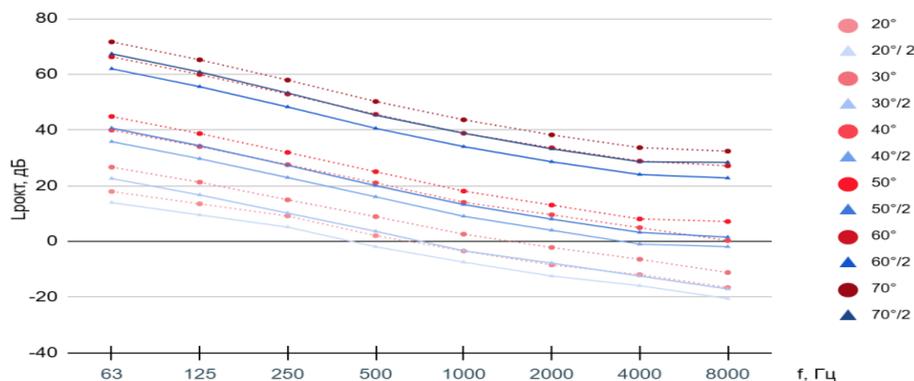


Рис. 1. Сравнительная диаграмма звукового давления при разной степени открытия клапана, КМС при установке непосредственно рядом с фасонным элементом сети
Fig. 1. Comparative diagram of sound pressure at different degrees of opening of the local resistance coefficient valve when installed directly next to the shaped network element

График (рис.1) показывает равномерное снижение шума от низкочастотных к высокочастотным полосам спектра. При закрытии створки клапана происходит значительное возрастание шума, возникающее в результате локального увеличения скорости воздушного потока и более резком разделении потока при прохождении препятствия, с увеличением длины вихревой зоны за регулирующим устройством. Стоит отметить, что формирование шума наиболее заметно при угле заслонки от 60°. Для обеспечения проектных расходов в системе вентиляции при осуществлении пуско-наладочных работ производится регулирование с помощью дроссель-клапанов. При наличии сложной и разветвленной аэродинамической сети, в особенности содержащей ответвления различной длины с сильно отличающимися расходами воздуха, часть ответвлений приходится «под-

жимать», то есть создавать избыточные потери давления на регулирующим устройствах. Данный фактор приводит к значительному повышению уровней шума, что подтверждают результаты расчетов, представленных на рис. 1.

При сравнении допустимых уровней шума для жилых зданий и полученных значений для дроссель-клапана были обнаружены превышения при угле открытия створки 60–70 градусов в различных его положениях (рис. 2).

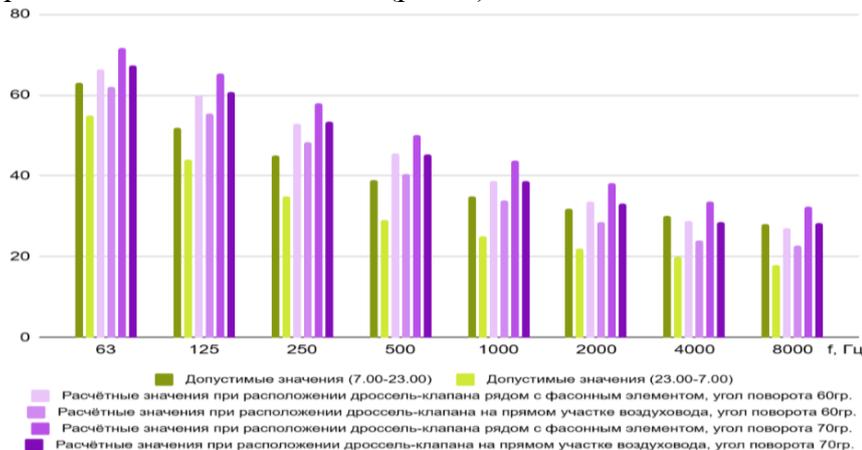


Рис. 2. Сравнительная диаграмма допустимых параметров в жилых комнатах и расчетных параметров от одного элемента сети

Fig. 2. Comparative diagram of permissible parameters in living rooms and calculated parameters from a single network element

Значения уровней звуковой мощности от дроссель-клапана превышают нормируемые значения для жилых помещений на 5–15% в зависимости от градуса его открытия. При этом не были учтены другие элементы вентиляционной сети, которые также создают шум (вентилятор, фасонные элементы, воздухораспределительные устройства).

Следующим этапом был произведен расчет уровней звуковой мощности одностворчатого дросселирующего клапана по трем представленным методикам. Далее результаты расчетов сравнивались с результатами натуральных испытаний. В качестве исследуемой системы был выбран прямой участок воздуховодной сети круглого сечения с диаметром 125 мм. Расчетный расход воздуха составил 144 м³/ч, скорость 3 м/с. Угол раскрытия створки дроссель-клапана составил 40°.

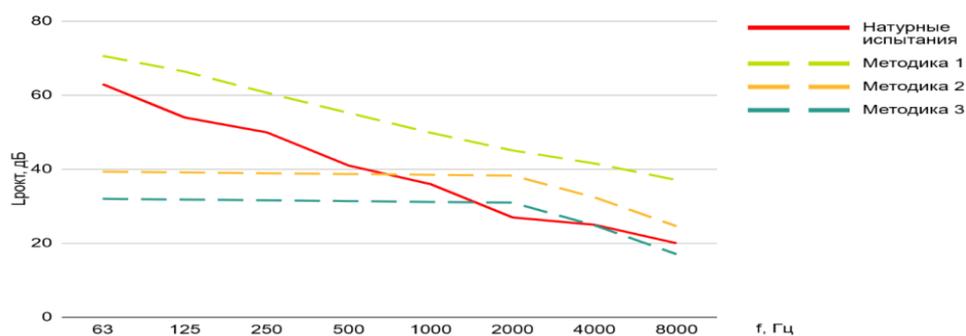


Рис. 3. Сравнительная диаграмма значений из каталога и рассчитанных по формулам

Fig. 3. Comparative diagram of permissible parameters in living rooms and calculated parameters from a single network element

Вывод. При расчете низкочастотного шума были выявлены значительные отклонения от данных натуральных испытаний при применении методики 2 и 3. Методика 1 наоборот, показывает завышенные уровни звуковой мощности на всех октавных полосах, что дает необходимый запас, в случае увеличения угла поворота створки клапана при проведении пуско-наладочных работ.

Наибольшее среднее расхождение с результатами натуральных испытаний прямого участка воздуховода с дросселирующим устройством было выявлено при расчете по ме-

тодике 3 (34,5%). Среднее процентное отклонение 1 и 2 методики составило 26,3% и 28,4 % соответственно. Недостатком формул методики 2 и 3 является то, что они не учитывают взаимное влияние фасонных элементов и акустическое воздействие присоединения воздуховода к дросселю, что приводит к необходимости дальнейшей верификации методик расчета для сложных систем и введению дополнительных поправок [17].

Инженерные решения систем вентиляции требуют анализа работы и проверки аэродинамических характеристик различных типов регулирующих устройств (дроссель-клапанов, ирисовых диафрагм, сопловых регуляторов, а также регуляторов постоянного расхода воздуха), поскольку они оказывают значительное влияние не только на уровень шума в помещениях, но и энергоэффективность и технологическую надежность систем [18-23]. Современные методы математического моделирования с использованием различных моделей турбулентности [24, 25] могут обеспечить точный прогноз уровней шумового воздействия.

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. Rasmussen B., Carrascal T. Noise from ventilation systems in dwellings - Regulations and field test procedures in selected countries in Europe. *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*. 2023. Vol. 265 (1). Pp. 6221-6229. DOI: 10.3397/IN_2022_0926
4. Kowalska-Koczwara A., Pachla F., Nering K. Environmental Protection Against Noise and Vibration. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 1203. No. 032026. DOI: 10.1088/1757-899X/1203/3/032026
5. 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
6. 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
7. Kopania J. M., Bogusławski G., Gaj P. Wójciak K. Aeroacoustical study of the serrated ventilation dampers. *Vibrations in Physical Systems*. 2022. Vol. 33(3). 2022313 DOI: 10.21008/j.0860-6897.2022.3.13
8. Гусев В.П. Еще раз о шумовых характеристиках вентоборудования и акустических возможностях шумоглушителей. *АВОК*. 2008. № 2. С. 48–55
9. Harvie-Clark J., Conlan N., Wei W., Siddall M. How loud is too loud? noise from domestic mechanical ventilation systems. *International Journal of Ventilation*. 2019. Vol. 18 (3). Pp. 1–10. DOI: 10.1080/14733315.2019.1615217
10. Абрамкина Д.В., Иванова А.О. Исследование уровней шума от вентиляционных систем в межквартирных коридорах жилых зданиях. *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. № 8 (11). С. 32-41. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-1-32-41
11. Fan X., Shao H., Sakamoto M. The effects of ventilation and temperature on sleep quality and next-day work performance: Pilot measurements in a climate chamber. *Building and Environment*. 2021. Vol. 209. No. 108666. DOI: 10.1016/j.buildenv.2021.108666
12. Гусев В.П. Акустический расчет как основа для проектирования малозумной системы вентиляции (кондиционирования). *АВОК*. 2004. № 6. С. 60–68
13. Lucic M. CFD simulation of airflow through the throttle body of the air intake system applied to the Formula Student vehicle. *International Scientific Journal "Machines. Technologies. Materials"*. 2023. Iss. 1. Pp. 7-11
14. Abramkina D.V. Noise from mechanical ventilation systems in residential buildings. *E3S Web of Conferences*. 2023. Vol. 457. 02007. DOI:10.1051/e3sconf/202345702007
15. Long M. Architectural Acoustics. 2014. 950 Pp. DOI: 10.1016/C2009-0-64452-4
16. Güngör F. Computer aided noise prediction in heating, ventilating and air conditioning systems. M. Sc. Thesis, Middle East Technical University, Ankara. 2003. 196 P.
17. Chenzhi C., Cheuk M. M. Generalized flow-generated noise prediction method for multiple elements in air ducts. *Applied Acoustics*. 2018. Vol. 135. Pp. 136-141. DOI: 10.1016/j.apacoust.2018.02.008
18. Skorik T., Galkina N., Glazunova E. Verification of the ventilation dampers' aerodynamic characteristics. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 913 No. 042043. DOI: 10.1088/1757-899X/913/4/042043

19. Cicca, Gaetano and Marsilio, Roberto and Resta, Emanuele and Hassan, Jehangir and Ferlauto, Michele. *A Framework for Testing Differential Throttling in Linear Aerospike Nozzle*. 2024. Pp. 382-387. <https://doi.org/10.1109/MetroAeroSpace61015.2024.10591557>
20. Lin, Bo-Chuan and Chang, Cheng and Yuan, Tony. *Observation of Air Throttling Applied in Supersonic Flow*. 2024. <https://doi.org/10.2514/6.2024-1614>
21. Liaposhchenko, Oleksandr and Bondar, Dmytro and Ochowiak, Marek and Pavlenko, Ivan and Włodarczyk, Sylwia. *Modeling of Separation with Drying Processes for Compressed Air Using an Experimental Setup with Separation-Condensation and Throttling Devices*. *Energies*. 2024. 17. 3129. <https://doi.org/10.3390/en17133129>
22. Basharina, T. and Pikalov, I. and Yeltsov, I. and Levin, V. *Investigation of influence of geometry of jet orifice of throttling device on formation of cavitation*. *Safety and Reliability of Power Industry* 2024. 16. Pp. 241-247. <https://doi.org/10.24223/1999-5555-2023-16-4-241-247>
23. Chang, Gao and He, Tianqi and Kaili, Xu and Yan, Shuhang. *Development of New Spiral Throttling Device*. 2023. https://doi.org/10.1007/978-981-19-8780-9_109
24. 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
25. 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

References:

1. Leshko M.Yu. On the issue of noise generation of throttling devices. *Bulletin of MGSU*. 2011;3:82–86 (In Russ)
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. Rasmussen B., Carrascal T. Noise from ventilation systems in dwellings - Regulations and field test procedures in selected countries in Europe. INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings. 2023; 265(1):6221-6229. DOI: 10.3397/IN 2022 0926
4. Kowalska-Koczwara A., Pachla F., Nering K. Environmental Protection Against Noise and Vibration. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2021;1203:032026. DOI: 10.1088/1757-899X/1203/3/032026
5. Nering K. Perception of Structure-Borne Sound in Buildings in the Context of Vibration Comfort of Human in the Buildings. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2020;960.No. 022033. DOI: 10.1088/1757-899X/960/2/022033
6. 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; 4575–4579. DOI: 10.61782/fa.2023.1192
7. Kopania J. M., Bogusławski G., Gaj P. Wójciak K. Aeroacoustical study of the serrated ventilation dampers. *Vibrations in Physical Systems*. 2022; 33(3). 2022313 DOI: 10.21008/j.0860-6897.2022.3.13
8. Gusev V.P. Once again about the noise characteristics of ventilation equipment and the acoustic capabilities of silencers. *AVOK*. 2008V; 2: 48–55 (In Russ)
9. Harvie-Clark J., Conlan N., Wei W., Siddall M. How loud is too loud? noise from domestic mechanical ventilation systems. *International Journal of Ventilation*. 2019;18(3):1–10. DOI: 10.1080/14733315.2019.1615217
10. Abramkina D.V., Ivanova A.O. Study of noise levels from ventilation systems in inter-apartment corridors of residential buildings. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2022;8(11):32-41. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-1-32-41
11. Fan X., Shao H., Sakamoto M. The effects of ventilation and temperature on sleep quality and next-day work performance: Pilot measurements in a climate chamber. *Building and Environment*. 2021; 209(108666). DOI: 10.1016/j.buildenv.2021.108666
12. Gusev V.P. Acoustic calculation as a basis for designing a low-noise ventilation (air conditioning) system. *AVOK*. 2004;6: 60–68 (In Russ)
13. Lucic M. CFD simulation of airflow through the throttle body of the air intake system applied to the Formula Student vehicle. *International Scientific Journal "Machines. Technologies. Materials"*. 2023;1:7-11
14. Abramkina D.V. Noise from mechanical ventilation systems in residential buildings. E3S Web of Conferences. 2023. Vol. 457. 02007. DOI:10.1051/e3sconf/202345702007
15. Long M. Architectural Acoustics. 2014; 950. DOI: 10.1016/C2009-0-64452-4
16. Güngör F. Computer aided noise prediction in heating, ventilating and air conditioning systems. M. Sc. Thesis, Middle East Technical University, Ankara. 2003;196.
17. Chenzhi C., Cheuk M. M. Generalized flow-generated noise prediction method for multiple elements in air ducts. *Applied Acoustics*. 2018;135:136-141. DOI: 10.1016/j.apacoust.2018.02.008
18. Skorik T., Galkina N., Glazunova E. Verification of the ventilation dampers' aerodynamic characteristics. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2020;913:042043. DOI: 10.1088/1757-899X/913/4/042043

19. Cicca, Gaetano and Marsilio, Roberto and Resta, Emanuele and Hassan, Jehangir and Ferlauto, Michele. *A Framework for Testing Differential Throttling in Linear Aerospace Nozzle*. 2024;382-387. <https://doi.org/10.1109/MetroAeroSpace61015.2024.10591557>
20. Lin, Bo-Chuan and Chang, Cheng and Yuan, Tony. *Observation of Air Throttling Applied in Supersonic Flow*. 2024. <https://doi.org/10.2514/6.2024-1614>
21. Liaposhchenko, Oleksandr and Bondar, Dmytro and Ochowiak, Marek and Pavlenko, Ivan and Włodarczyk, Sylwia. *Modeling of Separation with Drying Processes for Compressed Air Using an Experimental Setup with Separation–Condensation and Throttling Devices*. *Energies*. 2024;17:3129. <https://doi.org/10.3390/en17133129>
22. Basharina, T. and Pikalov, I. and Yeltsov, I. and Levin, V. *Investigation of influence of geometry of jet orifice of throttling device on formation of cavitation*. *Safety and Reliability of Power Industry* 2024;16: 241-247. <https://doi.org/10.24223/1999-5555-2023-16-4-241-247>
23. Chang, Gao and He, Tianqi and Kaili, Xu and Yan, Shuhang. *Development of New Spiral Throttling Device*. 2023. https://doi.org/10.1007/978-981-19-8780-9_109
24. Nering K., Nering K. *Validation of Modified Algebraic Model during Transitional Flow in HVAC Duct*. *Energies*. 2021;14(3975) DOI: 10.3390/en14133975
25. 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

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

Павлов Михаил Васильевич, кандидат технических наук, доцент, доцент, кафедра теплогазоснабжения; pavlovmv@vogu35.ru; ORCID 0000-0002-8687-3296

Вафаева Христина Максудовна, инженер-исследователь, лаборатория самовосстанавливающихся конструкционных материалов; vafaeva.khm@gmail.com; ORCID 0000-0002-7422-5494

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, Graduate 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

Mikhail V. Pavlov, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Assoc. Prof., Department of Heat, Gas and Water Supply; pavlovmv@vogu35.ru; ORCID 0000-0002-8687-3296

Khristina M. Vafaeva, Research Engineer, Laboratory of Self-Healing Structural Materials; vafaeva.khm@gmail.com; ORCID 0000-0002-7422-5494

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 01.07.2024.

Одобрена после рецензирования / Revised 30.07.2024.

Принята в печать /Accepted for publication 30.07.2024.

**Оптимизация параметров сейсмоизоляции каркасных зданий
с применением адаптивных методов**

Х.Р. Зайнулабидова

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

Резюме. Цель. Цель работы – расчёт каркасных зданий с гибкими связями и с гибкими и выключающимися связями, составление рекомендаций применения способов сейсмоизоляции в зависимости от характеристик сейсмических событий. **Метод.** Разработка алгоритма расчёта каркасных зданий рамной конструктивной системы с сейсмозащитой в зданиях с гибкими связями и с гибкими и выключающимися связями. **Результат.** Разработана методика расчёта каркасных зданий рамной конструктивной системы с сейсмоизоляцией в виде гибких связей и гибких и выключающихся связей. Составлена программа расчёта на ЭВМ сейсмоизолированных и не сейсмоизолированных каркасных зданий в среде программирования «Дельфи 5.0» на языке «Object Pascal» с использованием численного метода Рунге-Кутты 4-го порядка для решения дифференциальных уравнений. **Вывод.** Определено, что строительство каркасных зданий с рассмотренными в данной работе методами сейсмоизоляции, а именно с гибкими связями; с гибкими связями и выключающимися связями для территорий, где возможны длиннопериодные колебания не целесообразно, в связи с тем, что возникают чрезмерно высокие деформации.

Ключевые слова: каркасные здания, рама, гибкие связи, выключающиеся связи, периоды колебаний, сейсмические воздействия

Для цитирования: Х.Р. Зайнулабидова. Оптимизация параметров сейсмоизоляции каркасных зданий с применением адаптивных методов. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2024;51(3):180-188. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-3-180-188

Optimization of seismic insulation parameters of frame buildings using adaptive methods
H.R. Zainulabidova

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

Abstract. Objective. The purpose of the work is to calculate frame buildings with flexible connections and with flexible and switch-off connections, to make recommendations for the use of seismic insulation methods depending on the characteristics of seismic events. **Method.** Development of an algorithm for calculating frame buildings of a frame structural system with seismic protection in buildings with flexible connections and with flexible and switchable connections. **Result.** A method for calculating frame buildings of a frame structural system with seismic insulation in the form of flexible connections and flexible and switchable connections has been developed. A computer calculation program for seismically insulated and non-seismically insulated frame buildings in the Delphi 5.0 programming environment in the Object Pascal language using the Runge-Kutta numerical method of the 4th order for solving differential equations has been compiled. **Conclusion.** It is determined that the construction of frame buildings with the seismic insulation methods considered in this paper, namely with flexible connections and with flexible connections and disconnecting connections, is not impractical for territories where long-period fluctuations are possible, due to the fact that excessively high deformations occur

Keywords: frame buildings, frame, flexible connections, disconnecting connections, periods of oscillation, seismic effects

For citation: H.R. Zainulabidova. Optimization of seismic insulation parameters of frame buildings using adaptive methods. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2024; 51(3):180-188. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-3-180-188

Введение. Последствия землетрясений происшедших в 2023 и в 2024 годах в Турции [1], в Японии [2], в Марокко [3] в Афганистане [4] и в других районах мира, показывают, что несмотря на развитие методов сейсмоизоляции, здания всё-таки повреждаются и рушатся, что представлять серьёзную угрозу жизни людей. Хотя перечисленные районы давно известны как сейсмоопасные и, следовательно, здания здесь строились с учётом сейсмической опасности. Почему здания разрушились, унося собой жизни многих людей, в чём причина катастрофических последствий? Это вопросы, над которыми учёным всего мира предстоит ещё работать. К сожалению, надо признать, что землетрясения не повторяют прошлого и не повторяются в таком же виде в будущем.

Землетрясения, это случайные события и лучшую математическую модель сейсмических воздействий даёт теория случайных функций. Понятно только одно, что чем мощнее землетрясение, тем сильнее толчки. Изучив землетрясения прошлого (статистику, параметры колебаний, механизм) можно оценить сейсмическую опасность. Оказалось, что существенное влияние на интенсивность воздействия оказывают геологические условия территорий, в том числе литологический состав грунта, гидрогеологические условия и другие параметры, касающиеся грунтовых условий [5, 6]. Например, при Карпатском землетрясении 4 марта 1977 года [7] здания, стоявшие на пологих склонах, состоящие из скальных пород, прикрытых рыхлыми грунтами разламывались, то есть произошли неравномерные осадки грунта, что и привело к таким последствиям.

При сильных землетрясениях здания могут раскачиваться так сильно, что происходят разрушения связей между конструкциями. Наиболее опасным случаем для зданий при землетрясениях является эффект резонанса (совпадение периодов собственных колебаний зданий с преобладающим периодом колебания грунта), который значительно увеличивает амплитуду колебания здания, что приводит к значительным деформациям и даже к разрушению. Для предупреждения явления резонанса, а также осуществления полноценной оценки и корректного учета действующих на здания нагрузок, при расчёте сейсмостойкости необходимо учитывать динамические характеристики зданий при возможных сейсмических воздействиях, в том числе частоты и формы собственных колебаний, позволяющие осуществить резонансный анализ и сопоставить параметры собственных колебаний с рабочим диапазоном колебаний внешних воздействий. Соответственно при выборе метода сейсмозащиты необходимо учитывать наиболее вероятностные для района строительства количественные параметры колебания грунта и динамические характеристики здания.

В настоящее время существует более сотни запатентованных способов сейсмозащиты зданий. Среди них можно отметить сейсмоизолирующий скользящий пояс [8], кинематические фундаменты [9], выключающиеся связи [10], резинометаллические опоры [11] и др. Но вместе с тем, в нашей стране активнее всего применяют, так называемую, традиционную систему сейсмоизоляции, заключающуюся в увеличении пространственной жесткости зданий за счёт увеличения армирования, площадей поперечных сечений конструкций и т.д.

Надо отметить, что, используя такой метод сейсмостойкость можно увеличить, но не всегда такой метод экономически оправдан, так как при этом увеличивается масса конструкций и здания в целом, а это в свою очередь приводит к увеличению инерционной сейсмической нагрузки. Необходимо активное внедрение новых эффективных методов сейсмозащиты, методов, способствующих изменению жесткостей системы в зависимости от ее перемещений и скоростей. Вопрос заключается в том, как выбрать среди стольких методов сейсмоизоляции оптимальный вариант.

Постановка задачи. В данной работе проведены исследования поведения каркасных зданий при сейсмических воздействиях. Для сравнительного анализа рассмотрены здания с несколькими видами сейсмозащиты: с гибкими связями, с гибкими связями и выключающимися связями, с гибкими связями и выключающимися связями и ограничителями колебаний. Исследования российских и зарубежных учёных [12 - 17] показали, что снизить стоимость строительства можно допустив возникновение неупругих деформаций в конструкциях зданий. Но также определено, что такие деформации допустимы только в горизонтальных несущих конструкциях, таких как ригели, диафрагмы жёсткости, связи, но недопустимы в вертикальных несущих конструкциях – колоннах, так как в этом случае возможны разрушения зданий. Оказалось, эффективным решением вводить дополнительные гибкие связи в диафрагмы жёсткости, так как в этом случае происходит активное поглощение сейсмической энергии.

На рис. 1а, 1б и 1в приведены конструктивные схемы и графики реакций на динамические нагрузки рамных систем с элементами сейсмозащиты. Расчётные модели рамных систем зависят от метода сейсмозащиты, так систему с гибкими связями смоделируем упругопластическим осциллятором, а систему с гибкими связями и с выключающимися связями, а также с упругими ограничителями перемещений – нестационарным упругопластическим осциллятором.

Обозначим через K_1 жесткость рамной системы сейсмоизоляции с гибкими связями. Жесткость системы с выключающимися связями в начальном состоянии обозначим через K_n , а жесткость рамной системы при максимально допустимом перемещении – K_2 . На рис. 1 приняты обозначения: Y_p – максимальные перемещения системы, соответствующий выключению связей, Y_T – перемещение, при котором гибкие связи переходят с стадию неустойчивости; Δ – максимальный зазор.

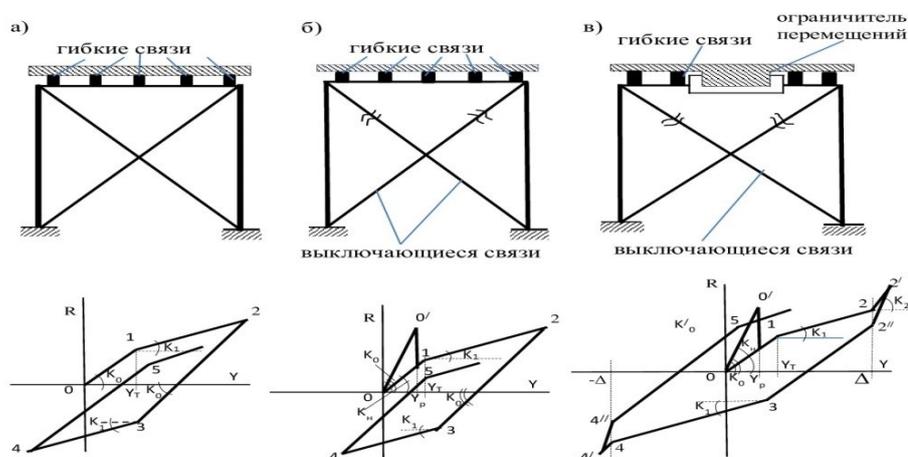


Рис. 1. Конструктивные схемы и соответствующие им графики реакции систем: а) с гибкими связями, б) с гибкими связями и с выключающимися связями, в) с гибкими связями с ограничителем перемещений и с выключающимися связями

Fig. 1. Design diagrams and corresponding graphs of the reaction of the systems: a) with flexible connections, b) with flexible connections and with switchable connections, c) with flexible connections with a displacement limiter and with switchable connections

Коэффициент потери жесткости рамной системой при переходе из гибкой стадии в пластическую $\beta = \frac{K_1}{K_0} \leq 1$. Если $\beta=1$, то рамная система сохраняет гибкую стадию работы. Перемещение Y_T можно определить через максимальные перемещения гибкой рамной системы с жесткостью K_0 , $Y_T = \gamma \cdot Y_Y^{max}$, где γ – коэффициент ($0 < \gamma < 1$), а Y_Y^{max} – максимальное перемещение системы в состоянии гибкой работы пластических элементов.

Методы исследования. Составим алгоритм расчёта исследуемых рамных систем. Рассмотрим график « $Y-R$ », соответствующий рамной системе с выключающимися в начале связями, гибкими элементами и упругими ограничителями перемещений, установлен-

ные с зазором Δ (рис.1в). Меняя параметры характеристик системы $K_0, \gamma, \beta, \Delta$ данного графика можно перейти к графикам с разными вариантами сейсмозащиты.

При $\Delta \approx \infty$ получим график, соответствующей рамной системе с выключающимися и гибкими связями. Если принять $Y_p=0$ и $\Delta \approx \infty$, то получим график, соответствующий системе с гибкими связями. При $Y_p=0, Y_Y^{max} < \Delta < Y_{Y-n}^{max}$, получим график, определяющий колебания рамной системы ограничителями перемещений. Здесь Y_{Y-n}^{max} – максимальное перемещение рамной системы в уровне верха стоек. Если принять $\beta=1$, то можно определить параметры рамных систем с жёсткими связями между элементами.

Рассмотрим каждый этап движения системы, показанный на рис.1а, 1б и 1в отдельно как участок движения и составим уравнения колебания для каждого участка.

Участок 0-0¹ графика на рис. 1а и 1б соответствует стадии работы до отключения связей. Рама в этом состоянии работает податливо, так как $Y_p < Y_t$, то дифференциальное уравнение колебаний можно записать в виде:

$$\ddot{Y}_0 + \frac{2\pi}{T_n} \cdot \alpha \cdot \dot{Y}_0 + \left(\frac{2\pi}{T_n}\right)^2 \cdot Y_0 = -\ddot{Y}_{rp}(t) \quad (1)$$

Где: $\ddot{Y}_i, \dot{Y}_i, Y_i$ ($i=0, 1, 2, \dots$) – ускорение, скорость и перемещение соответственно;
 T_n – период колебаний рамы в начальный период с выключающимися элементами;
 α – коэффициент затухания рамы.

В момент времени t_p , когда перемещение $|Y_0|$ достигает максимального значения Y_p , связи выключаются, снижается жесткость и рама переходит на участок 0-1 графика, сохраняя при этом начальные условия.

Уравнение колебания рамы на участке 0-1 имеет вид

$$\ddot{Y}_1 + \frac{2\pi}{T} \cdot \alpha \cdot \dot{Y}_1 + \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \cdot Y_1 = -\ddot{Y}_{rp}(t) \quad (2)$$

где T – период колебаний рамы в состоянии гибкой работы податливых элементов.
 $T = 2 \cdot \frac{\pi}{\omega}, \quad \omega = \sqrt{K_0/m}$

В момент времени t_1 перемещение Y_1 достигает $Y_{1,Y}^{max}$, рама получает новую жесткость и переходит на участок 1-2. При этом состояние рамы можно описать дифференциальным уравнением:

$$\ddot{Y}_2 + \frac{2\pi}{T} \cdot \sqrt{\beta \cdot \alpha} \cdot \dot{Y}_2 + \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \cdot \gamma \cdot Y_{1,Y}^{max} + \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \cdot \beta [Y_2 - Y_1(t_1)] = -\ddot{Y}_{rp}(t); \quad (3)$$

$t \geq 1$

Из участка 1-2 рама переходит на участок 2-2¹, если выполнится условие $Y_2 > \Delta$, или на участок 2-3 (рис.1б), т.е. в стадию разгрузки, если $Y_2 \leq \Delta$ и изменится знак скорости колебания, $\dot{Y}_{2,t} / \dot{Y}_{2,t+1} < 0$.

Если обнаруживается изменения знака скорости в интервале времени $(t+1)-t$, то в программе расчета происходит возврат к времени t и дробление шага, пока разность между новым шагом и предыдущим не будет равна заданной величине.

В стадии разгрузки уравнение движения системы принимает вид

$$\ddot{Y}_3 + \frac{2\pi}{T} \cdot \alpha \cdot \dot{Y}_3 + \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \cdot \{Y_3 - Y_2(t_2) + \gamma \cdot Y_{1,Y}^{max} + \beta \cdot [Y_2(t_2) - Y_1(t_1)]\} = \ddot{Y}_{rp}(t); t \geq t_2 \quad (4)$$

Где: t_2 - момент времени изменения знака скорости рамы.

При переходе на участок 2-2¹ система получает новую жесткость, и уравнение движения принимает вид

$$\ddot{Y}_{2^1} + \frac{2\pi}{T} \cdot \sqrt{Q} \cdot \dot{Y}_{2^1} + \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \cdot \{\gamma \cdot Y_{1,Y}^{max} + \beta \cdot [\Delta - Y_1(t_1)] + Q \cdot [Y_{2^1} - \Delta]\} = -\ddot{Y}_{rp}(t); \quad (5)$$

Где $\Theta = K_2/K_0$, где K_2 – жесткость рамы в состоянии упора об ограничитель перемещений на рассматриваемом участке, $K_2=K_1+K_{ог}$, где $K_{ог}$ жесткость ограничителя перемещений.

Из участка 2-2¹ в момент времени $t_2^1 > t_2$, соответствующий изменению знака скорости \dot{Y}_{2^1} , рама переходит в стадию разгрузки (участок 2¹-2^{II}), которую можно описать дифференциальным уравнением колебаний:

$$\ddot{Y}_1^{11} + \frac{2\pi}{T} \cdot \sqrt{Q + (1 - \beta)} \cdot \alpha \cdot \dot{Y}_2^{11} + \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \cdot \{\gamma \cdot Y_{1,Y}^{max} + \beta \cdot [\Delta - Y_1(t_1)] + [Q + (1 - \beta)] \cdot [Y_{2^{11}} - Y_{2^1}(t_{2^1})] + Q \cdot [Y_{2^1}(t_{2^1}) - \Delta]\} = -\ddot{Y}_{rp}(t); t \geq t_{2^1} \quad (6)$$

Когда перемещение $Y_{2^{11}}$ становится равным Δ , то исследуемая система переходит на участок разгрузки 2¹¹-3

$$\ddot{Y}_3 + \frac{2\pi}{T} \cdot \dot{Y}_3 + \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \cdot \{Y_3 - \Delta + \gamma \cdot Y_{1,Y}^{max} + \beta \cdot [\Delta - Y_1(t_1)] - [Y_{2^1}(t_{2^1}) - \Delta] \cdot (1 - \beta)\} = -\ddot{Y}_{rp}(t) \quad (7)$$

Переход рамной системы в состояние обратное состояние податливости (участок 3-4) произойдет, когда перемещение Y_3 достигнет величины:

$$Y_3 = \Delta - 2\gamma \cdot Y_{1,Y}^{max} - \beta \cdot (\Delta - \gamma \cdot Y_{1,Y}^{max}) + [Y_{2^1}(t_{2^1}) - \Delta] \cdot (1 - \beta) \quad (8)$$

Если происходит разгрузка без упора об ограничитель помещений ($Y_2 \leq \Delta$), то будет переход на участок 3-4, если выполняются условия

$$Y_3 = Y_2(t_2) - 2\gamma \cdot Y_{1,Y}^{max} - \beta \cdot (Y_2(t_2) - \gamma \cdot Y_{1,Y}^{max}) \quad (9)$$

Обозначим момент времени выполнения условия (8) или (9) через t_3 .

Уравнение движения системы при условном «усилении» в направлении 3-4 имеет вид

$$\ddot{Y}_4 + \frac{2\pi}{T} \cdot \sqrt{\beta} \cdot \alpha \cdot \dot{Y}_4 + \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \cdot \{-\gamma \cdot Y_{1,Y}^{max} + \beta \cdot [Y_4 - Y_3(t_3)]\} = -\ddot{Y}_{rp}(t); t \geq t_3 \quad (10)$$

Если при этом перемещение рамной системы не превысит зазора до ограничителя $|Y_4| \leq \Delta$ и скорость изменит знак $\frac{\dot{Y}_{4,t}}{\dot{Y}_{4,t+1}} < 0$, то с момента t_4 изменения знака скорости начинается второе нагружение 4-5 (второй цикл), где уравнение движения принимает вид:

$$\ddot{Y}_5 + \frac{2\pi}{T} \cdot \alpha \cdot \dot{Y}_5 + \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \cdot \{Y_5 - Y_4(t_4) - \gamma \cdot Y_{1,Y}^{max} + \beta \cdot [Y_4(t_4) - Y_3(t_3)]\} = -\ddot{Y}_{rp}(t); t \geq t_4 \quad (11)$$

В момент времени $t=t_5$, когда перемещение Y_5 достигает значения

$$Y_5 = Y_4(t_4) + 2 \cdot \gamma \cdot Y_{1,Y}^{max} - \beta \cdot [Y_4(t_4) - Y_3(t_3)] \quad (12)$$

уравнение (11) преобразуется в уравнение (13).

Если на участке 3-4 рассматриваемой диаграммы перемещение Y_4 превысит зазор до ограничителя, $|Y_4| > \Delta$, то система переходит на участок 4-4¹, описываемый уравнением движения

$$\ddot{Y}_{4^1} + \frac{2\pi}{T} \cdot \sqrt{Q} \cdot \alpha \cdot \dot{Y}_{4^1} + \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \cdot \{-\gamma \cdot Y_{1,Y}^{max} + \beta \cdot (-\Delta - Y_3(t_3) + Q(Y_{4^1} + \Delta))\} = -\ddot{Y}_{rp}(t) \quad (13)$$

При этом, в стадию разгрузки рама перейдет в момент времени t_4 , соответствующий изменению знака скорости \dot{Y}_{4^1} . Уравнение движения рамы на участке 4¹-4^{II} получим в виде

$$\ddot{Y}_{4^{II}} + \frac{2\pi}{T} \cdot \sqrt{Q + (1 + \beta)} \cdot \alpha \cdot \dot{Y}_{4^{II}} + \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \cdot \{-\gamma \cdot Y_{1,Y}^{max} + \beta[-\Delta - Y_3(t_3)] + [Q + (1 - \beta)] \cdot [Y_{4^{II}} - Y_{4^1}(t_{4^1}) + \Delta]\} = -\ddot{Y}_{rp}(t); t \geq t_{4^1} \quad (14)$$

Как только перемещение $Y_{4^{II}}$ станет равным $-\Delta$, рамная система перейдет на следующий участок разгрузки 4^{II}-5, дифференциальное уравнение движения для которого имеет вид

$$\ddot{Y}_5 + \frac{2\pi}{T} \cdot \alpha \cdot \dot{Y}_5 + \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \cdot \{Y_5 + \Delta - \gamma \cdot Y_{1,Y}^{max} + \beta \cdot [-\Delta - Y_3(t_3)] - (1 - \beta) \cdot [Y_{4^1}(t_{4^1}) + \Delta]\} = -\ddot{Y}_{rp}(t); \quad (15)$$

Здесь также, как и в случае колебания системы без упора об ограничитель перемещений, в момент $t=t_5$, когда перемещение Y_5 достигнет значения

$$Y_5 = -\Delta - 2 \cdot \gamma \cdot Y_{1,Y}^{max} - \beta[-\Delta - Y_3(t_3)] + (1 - \beta) \cdot [Y_{4^1}(t_{4^1}) + \Delta], \quad \text{уравнение (15)}$$

преобразуется в уравнение (3).

Если принять, что жёсткость системы при сейсмических воздействиях на этапах деформации не меняется, то закономерности деформации системы не зависят от времени t . Тогда перемещение Y_5 переходит в Y_2 , а Y_2 , в Y_3 и т.д. Так, каждый этап перемещения системы будет проходить по закону движения, согласно уравнениям (3) - (7), (10), (11) (13) – (15) вплоть до окончания сейсмического воздействия, заданного в виде функции $\ddot{Y}_{гр}(t)$. Для расчёта исследуемых систем разработана программа расчёта по приведённой выше методике на ЭВМ в среде программирования «Дельфи 5.0» на языке «Object Pascal». При этом, использовался численный метод Рунге-Кутты 4-го порядка для решения дифференциальных уравнений.

Рассчитывались максимальные ускорения W_Y^{max} и перемещения Y_Y^{max} гибкой рамной системы с периодом собственных колебаний T , а также максимального ускорения W_{Y-n}^{max} , перемещения Y_{Y-n}^{max} и остаточной деформации $Y_{ост}$ гибкой системы без элементов сейсмозащиты и с элементами сейсмозащиты при разных значениях коэффициентов γ и β . А также определялись отношения W_{Y-n}^{max}/W_Y^{max} , Y_{Y-n}^{max}/Y_Y^{max} , число циклов колебаний, число упора системы об ограничители перемещений, момент времени выключения хрупких элементов t_p и момент времени реализации максимального ускорения системы.

Обсуждение результатов. Известно, что на реакцию системы при сейсмических воздействиях существенно влияет частота колебаний грунтов, колебания могут быть короткопериодными и длиннопериодными. В данной работе изучено влияние этого фактора и получено, что максимальные перемещения рамных систем с гибкими связями при длиннопериодных воздействиях получают недопустимо большие перемещения. Исправить такую ситуацию можно, если включить в систему ограничители колебаний.

В ходе исследования выполнены расчёты рамных систем при сейсмических воздействиях с системами со следующими методами сейсмоизоляции: с гибкими связями; с гибкими и выключающимися связями; с гибкими и выключающимися связями и с ограничителями перемещений, установленных с зазором $\Delta = 1,2 \cdot \gamma \cdot Y_Y^{max}$.

Жёсткость ограничителя перемещений принята равной жёсткости гибкой системы с периодом собственных колебаний $T=0,3$ сек. Расчёты проведены по алгоритму, соответствующему зависимости « $Y-R$ », показанной на рис. 1в, исключив из неё участок $0-0^1$. Некоторые результаты расчёта в виде спектров максимальных ускорений и максимальных перемещений, приведены на рис. 2 и 3.

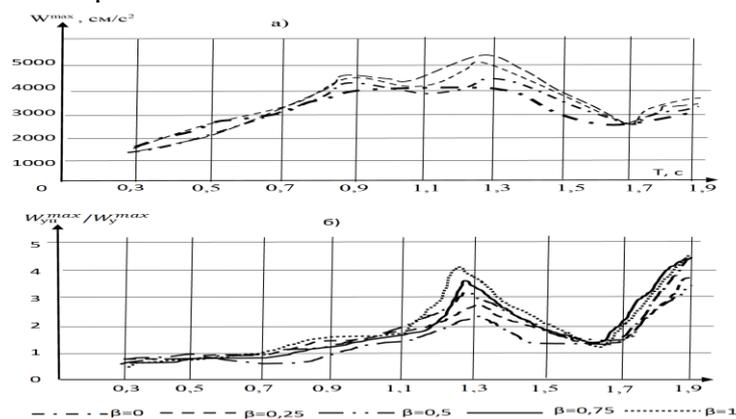


Рис. 2. Спектры максимальных абсолютных ускорений систем с гибкими связями и с ограничителем перемещений (а); графики отношения $\frac{W_{yn}^{max}}{W_Y^{max}}$ (б) при преобладающем периоде сейсмического воздействия $T_j=1,2$ сек

Fig. 2. Spectra of maximum absolute accelerations of an elastoplastic system with a displacement limiter (a); graphs of the ratio $\frac{W_{yn}^{max}}{W_Y^{max}}$ (b) with a predominant period of seismic action $T_j=1.2$ sec

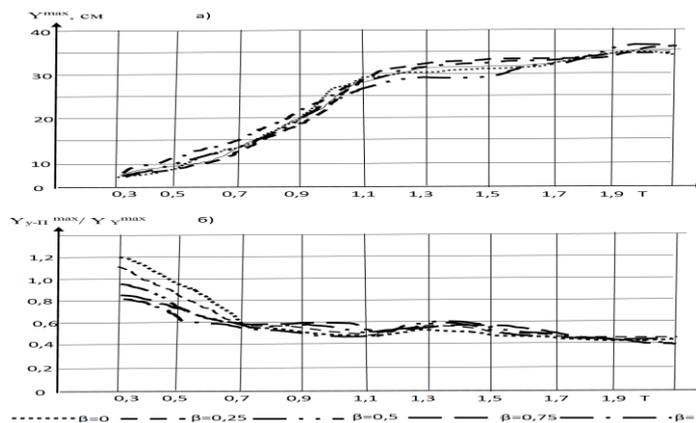


Рис. 3. Спектры максимальных перемещений системы с гибкими связями с ограничителем перемещений (а); графики отношения y_{y-p}^{max}/y_y^{max} (б) при преобладающем периоде сейсмического воздействия $T_j=1,2$ сек

Fig. 3. Spectra of maximum displacements of an elastoplastic system with a displacement limiter (a); graphs of the ratio y_{y-p}^{max}/y_y^{max} (b) with a predominant period of seismic action $T_j=1.2$ sec

Там же приведены графики отношений выше названных максимальных параметров к соответствующим параметрам реакций упругой системы без ограничителей перемещений.

Анализ результатов расчёта показал, что при принятых параметрах ограничителя, максимальные перемещения упругих и упругопластических систем при начальных периодах собственных колебаний $0,5 \text{ сек} \leq T \leq 1,9 \text{ сек}$ снижаются в 1,5-2 раза.

Влияние коэффициента β на максимальные перемещения систем здесь особо не заметно. Только в случае резонансных пиков с уменьшением β перемещения незначительно снижаются.

При периодах $T < 0,6 \text{ сек.}$, максимальные перемещения систем возрастают при уменьшении коэффициента β и уменьшении периодов T и T_j .

При периодах $T=0,5 \text{ сек}$, $T_j \leq 0,9 \text{ сек.}$ и значениях β , равных 0,25 и 0,3 максимальные перемещения с гибкими связями и ограничителями получаются близкими или равными максимальным перемещениям системы с гибкими связями.

Причиной этому является односторонний снос перемещений, характерный для систем с гибкими связями при малых значениях коэффициента β . Здесь, по мере увеличения циклов колебаний, зазор между системой и ограничителем с одной стороны постепенно уменьшается и в один момент, как бы прилипнув друг к другу, они начинают совершать совместные колебания. При этом дальнейший рост сноса перемещений почти приостанавливается.

Ограничители перемещений в системах с гибкими связями снижают максимальные остаточные перемещения при $\beta = 0$ в 7-9 раз, а при $\beta=0,5$ и $\gamma=0,25$ – в среднем в 5 раза. Более значительна роль ограничителей колебаний в снижении остаточных перемещений систем с гибкими связями. Например, при периодах $0,6 \text{ сек} \leq T \leq 0,9 \text{ сек}$ максимальные остаточные перемещения систем с коэффициентом $\beta=0$ не превышают 0,5-4 см, тогда как для таких же систем без ограничителей из-за сноса перемещений они достигают в среднем 25 см. Известно, что колебания систем с гибкими связями упором об жёсткие ограничители перемещений вызывают значительное увеличение инерционных сил в конструкциях, представляющих опасность для вышележащих этажей.

Вывод. Исследования показывают, что работа элементов нижнего этажа не приводит к значительному снижению данной опасности, хотя резонансные пики абсолютных ускорений, как видно на рис. 2, снижаются в 1,5-1,8 раза при значениях $\beta \leq 0,5$. Только при периодах $T \leq 0,9 \text{ сек}$ отношение максимального абсолютного ускорения системы с ограничителем перемещений к такому же ускорению упругой системы без ограничителя не превышает 2-х.

Исследования показали, что для каркасных зданий с периодом собственных колебаний $T \geq 0,8 \text{ сек}$ при строительстве в районах с длиннопериодными сейсмическими воз-

действиями рационально введение гибких связей с параметрами $0,25 \leq \gamma \leq 0,5$; $\varphi = 0,75 - \gamma$; $0,2c. \leq T \leq 0,9 c.$

При этих параметрах введение элементов сейсмозащиты в виде ограничителей перемещения нецелесообразно, так как при сейсмических воздействиях удары системы об ограничители вызывают значительное увеличение инерционных сил. Но дополнительно введённые жёсткие не выключающиеся связи увеличивают сейсмостойкость зданий.

Библиографический список:

1. Свалова В.Б. Землетрясения в Турции и Сирии 2023 года и геодинамика Кавказско-Анатолийского региона // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2023;(3):28-41. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2023-65-3-28-41>
2. "M 7.5 - 2024 Noto Peninsula, Japan Earthquake". United States Geological Survey. 1 January 2024. Archived from the original on 1 January 2024. Retrieved 1 January 2024.
3. Timoulali, Youssef; Nacer, Jabour; Youssef, Nahou; Mimoun, Chourak (2015). "Lithospheric structure in NW of Africa: Case of the Moroccan Atlas Mountains". *Geodesy and Geodynamics*. 6 (6): 397 — 408. Bibcode:2015G&G....6..397 T. doi:10.1016/j.geog. 2015. 12.003
4. National Earthquake Information Center. M 6.3 – 35 km NNE of Zindah Jān, Afghanistan. U.S. Geological Survey (October 7, 2023)
5. Уздин А.М., Смирнова Л.Н., Сорокина Г.В., Абакаров А.Д., Зайнулабидова Х.Р., Прокопович С.В. Статистическое моделирование сейсмических воздействий // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. - 2019. - № 5. - С. 19-27
6. Абакаров А.Д., Зайнулабидова Х.Р., Курбанов И.Б. Модель сейсмического воздействия для г. Махачкалы // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. - 2011. - № 3 (22). - С. 109-117
7. Карпатское землетрясение 4 марта 1977 г. и его последствия: [Сб. статей] / АН СССР, Междунед. совет по сейсмологии и сейсмостойкому строительству при Президиуме АН СССР; [Отв. ред. А.В. Друмя]. - М.: Наука, 1980. - 271 с.
8. Абакаров А.Д., Зайнулабидова Х.Р. Оценка областей рационального применения системы сейсмоизоляции зданий со скользящим фундаментальным поясом // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. - 2016. - Т. 40. - № 1. - С. 77-84
9. Абакаров А.Д., Зайнулабидова Х.Р. Сейсмическая реакция нелинейной системы сейсмозащиты с кинематическими опорами // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. - 2018. - Т. 45. - № 3. - С. 134-14
10. Чернов, Ю.Т. К расчету систем с выключающимися связями / Ю.Т. Чернов // Строительная механика и расчет сооружений. – 2010. – № 4 – С. 53–57
11. Mkrtychev O.V., Mkrtychev A.E. Analiz effektivnosti rezinometallicheskich opor pri stroitel'stve vysotnykh zdaniy v seysmicheskikh rayonakh [Efficiency Analysis of Rubber-metal Bearings in the Course of Construction of High-rise Buildings in Earthquake Areas]. Vestnik NITs "Stroitel'stvo" [Proceedings of Research Centre for Construction], 2010, no. 2 (XXVII), pp. 126—137
12. Абакаров А.Д., Зайнулабидова Х.Р. Влияние коэффициента трения-скольжения опорных элементов и параметров сейсмического воздействия на реакцию и надежность сооружений с сейсмозащитой // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. - 2021. - № 2. - С. 12-23
13. Кузнецова И.О., Ваничева С.С., Фрезе М.В., Долгая А.А., Азаев Т.М., Зайнулабидова Х.Р. Применение фрикционно-подвижных болтовых соединений для обеспечения сейсмостойкости строительных конструкций мостов и других сооружений // Известия Петербургского университета путей сообщения. - 2016. - Т. 13. - № 3 (48). - С. 353-360
14. Зайнулабидова Х.Р. Исследование влияния жесткости этажей на сейсмическую реакцию и надежность // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. - 2019. - № 4 (43). - С. 83-88
15. Воробьева К.В., Зайнулабидова Х.Р., Фрезе М.В. Учет демпфирования в задачах оценки сейсмостойкости зданий и сооружений // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. - 2016. - Т. 40. - № 1. С. 108-118
16. Бородин, Л.А. О расчете упругопластических систем при сейсмическом воздействии [Текст] / Л.А. Бородин // Строительная механика и расчет сооружений - 1982.- №1. - С.68-72.
17. Хачиян Э.Е. Амбарцумян В.А. Динамические модели сооружений в теории сейсмостойкости - М.: Наука, 1981 - 204 с.

References:

1. Svalova V.B. Earthquakes in Turkey and Syria in 2023 and geodynamics of the Caucasian-Anatolian region. *News of higher educational institutions. Geology and exploration*. 2023;(3):28-41. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2023-65-3-28-41> (In Russ)

2. M 7.5 - 2024 Noto Peninsula, Japan Earthquake". United States Geological Survey. 1 January 2024. Archived from the original on 1 January 2024. Retrieved 1 January 2024.
3. Timoulali, Youssef; Nacer, Jabour; Youssef, Hahou; Mimoun, Chourak (2015). "Lithospheric structure in NW of Africa: Case of the Moroccan Atlas Mountains". *Geodesy and Geodynamics*. 2015; 6 (6):397 — 408. Bibcode:2015G&G.....6..397 T. doi:10.1016/j.geog. 2015. 12.003
4. National Earthquake Information Center. M 6.3 – 35 km NNE of Zindah Jān, Afghanistan. U.S. Geological Survey (October 7, 2023)
5. Uzdin A.M., Smirnova L.N., Sorokina G.V., Abakarov A.D., Zainulabidova H.R., Prokopovich S.V. Statistical modeling of seismic impacts. *Earthquake-resistant construction. Safety of structures*. 2019;5:19-27 (In Russ)
6. Abakarov A.D., Zainulabidova H.R., Kurbanov I.B. Seismic impact model for Makhachkala. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2011;3(22):109-117(In Russ)
7. The Carpathian earthquake of March 4, 1977 and its consequences: [Collection of articles] USSR Academy of Sciences, Inter-Ved. Council on Seismology and Earthquake-resistant Construction under the Presidium of the USSR Academy of Sciences; [Ed. by A.V. Drumya]. *M.: Nauka*, 1980;271.(In Russ)
8. Abakarov A.D., Zainulabidova H.R. Assessment of the areas of rational application of the seismic insulation system of buildings with a sliding fundamental belt. *Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Sciences*. 2016; 40(1):77-84 (In Russ)
9. Abakarov A.D., Zainulabidova H.R. Seismic reaction of a nonlinear seismic protection system with kinematic supports. *Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Sciences*. 2018;45(3): 134-14 (In Russ)
10. Chernov, Yu.T. To the calculation of systems with switching connections. *Construction mechanics and calculation of structures*. 2010; 4:53-57 (In Russ)
11. Mkrtychev O.V., Mkrtychev A.E. Analiz effektivnosti rezinometallicheskikh opor pri stroitel'stve vysotnykh zdaniy v seymicheskikh rayonakh [Efficiency Analysis of Rubber-metal Bearings in the Course of Construction of High-rise Buildings in Earthquake Areas]. Vestnik NITs "Stroitel'stvo" [Proceedings of Research Centre for Construction]. 2010; 2 (XXVII):126—137
12. Abakarov A.D., Zainulabidova H.R. Influence of the coefficient of friction-sliding of support elements and parameters of seismic impact on the reaction and reliability of structures with seismic protection. *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Mechanics*. 202;2:12-23 (In Russ)
13. Kuznetsova I.O., Vanicheva S.S., Freze M.V., Dolgaya A.A., Azaev T.M., Zainulabidova H.R. The use of friction-movable bolted joints to ensure earthquake resistance of building structures of bridges and other structures. *Proceedings of the St. Petersburg University of Railway Engineering*. 2016;13(3 (48)):353-360 (In Russ)
14. Zainulabidova H.R. Investigation of the effect of floor stiffness on seismic response and reliability. *Academic Bulletin of UralNIiproekt RAASN*. 2019;4 (43): 83-88 (In Russ)
15. Vorobyova K.V., Zainulabidova H.R., Freze M.V. Accounting for damping in the tasks of assessing the seismic resistance of buildings and structures. *Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Sciences*. 2016; 40(1):108-118 (In Russ)
16. Borodin, L.A. On the calculation of elastoplastic systems under seismic action [Text] *Construction mechanics and calculation of structures* 1982;1:68-72. (In Russ)
17. Khachiyan E.E. Ambartsumyan V.A. Dynamic models of structures in the theory of seismic resistance - M.: Nauka, 1981;204. (In Russ)

Сведения об авторе:

Зайнулабидова Ханзада Рауповна, кандидат технических наук, доцент, заведующая кафедрой «Архитектура»; hanzada1@mail.ru

Information about the author:

Hanzada R. Zainulabidova, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof, Head Department of Architecture; hanzada1@mail.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 15.06.2024.

Одобрена после рецензирования/ Reved 21.07.2024.

Принята в печать/Accepted for publication 21.07.2024.

**Внедрение энергосберегающих технологий в домостроении
Е.И. Крупнов¹, И.А. Зайцева¹, С.А. Логинова², А.В. Симагин³**

¹Ивановский государственный политехнический университет,
¹153000, г. Иваново, Шереметевский пр-т, 21, Россия,

²Ярославский государственный технический университет,
²150023, г. Ярославль, Московский проспект, 88, Россия,

³Ивановское ЛПУМГ – филиал ООО «Газпром трансгаз Нижний Новгород»,
603000, г. Нижний новгород, ул. Звездинка, д.11, Россия

Резюме. Цель. За последние десятилетия благодаря своим преимуществам в энергоэффективности и экологичности тепловые насосы получили большую популярность, став одной из наиболее привлекательных альтернатив для замены традиционных систем отопления, работающих на ископаемом топливе. Эффективность теплового насоса является решающим фактором, который следует учитывать при выборе и оптимизации системы теплового насоса. Целью исследования являлась оценка эффективности применения воздушных тепловых насосов системы «воздух-вода» в климатических условиях, характерных для регионов центрального федерального округа. **Метод.** Для оценки эффективности применения воздушных тепловых насосов используется математическая модель, учитывающая многофакторность исследуемого процесса. **Результат.** Для адекватности сравнения полученных результатов исследования с паспортными эксплуатационными показателями использовался коэффициент трансформации (COP), показывающий отношение полученной энергии к затраченной работе. В результате более предпочтительным был признан способ отопления помещений воздушным тепловым насосом с комбинированным режимом работы. **Вывод.** В настоящее время потенциал тепловых насосов в области энергосбережения и снижения выбросов CO₂ в значительной степени остается не раскрытым, что и задает вектор дальнейших исследований.

Ключевые слова: энергосбережение, тепловой насос, энергопотребление, эффективность

Для цитирования: Е.И. Крупнов, И.А. Зайцева, С.А. Логинова, А.В. Симагин. Внедрение энергосберегающих технологий в домостроении. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2024;51(3):189-194. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-3-189-194

**Implementation of Energy-saving Technologies in House construction
E.I. Krupnov¹, I.A. Zaitseva¹, S.A. Loginova², A.V. Simagin³**

¹Ivanovo State Polytechnic University,

¹21 Sheremetevsky Ave., Ivanovo 153000, Russia,

²Yaroslavl State Technical University,

²88 Moskovsky Ave., Yaroslavl 150023, Russia

³Ivanovskoye LPUMG – branch of Gazprom transgaz Nizhny Novgorod LLC,

³11 Zvezdinka St., Nizhny Novgorod 603000, Russia

Abstract. Objective. Over the past decades, heat pumps have gained great popularity due to their advantages in energy efficiency and environmental friendliness, becoming one of the most attractive alternatives to replace traditional heating systems running on fossil fuels. Heat pump efficiency is a decisive factor that should be taken into account when selecting and optimizing a heat pump system. The aim of the study was to evaluate the efficiency of air source heat pumps of the air-to-water system in the climatic conditions typical of the regions of the

Central Federal District. **Method.** To evaluate the efficiency of air source heat pumps, a mathematical model is used that takes into account the multifactorial nature of the process under study. **Result.** To adequately compare the obtained research results with the passport performance indicators, the transformation coefficient (COP) was used, showing the ratio of the energy received to the expended work. As a result, the method of heating rooms with an air source heat pump with a combined operation mode was recognized as more preferable. **Conclusion.** Currently, the potential of heat pumps in the field of energy saving and CO₂ emission reduction remains largely untapped, which sets the vector for further research.

Keywords: energy saving, heat pump, energy consumption, economic efficiency

For citation: E.I. Krupnov, I.A. Zaitseva, S.A. Loginova, A.V. Simagin. Implementation of Energy-saving Technologies in House construction. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2024;51(3):189-194. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-3-189-194

Введение. При проектировании зданий с применением энергосберегающих технологий, в том числе с применением тепловых насосов, необходимо предусмотреть ряд мероприятий, направленных на снижение энергозатрат. В период эксплуатации тепловые насосы имеют различные значения выработки тепловой энергии и потребления электроэнергии [1]. Данные показатели зависят сразу от нескольких факторов. От правильности учета необходимой тепловой нагрузки и расхода электроэнергии зависит точность расчета эксплуатационных затрат, необходимых для работы теплового насоса [2-5].

Коэффициент трансформации (COP) является важным показателем для измерения эффективности тепловых насосов [6]. КПД тепловых насосов с воздушным источником может превышать 300%, поскольку они передают тепло, а не генерируют его. Для сравнения, электрические обогреватели работают с КПД около 100% (1 единица электроэнергии производит 1 единицу тепла), мазутные и газовые котлы достигают КПД около 90% [7, 8]. Проблема в сравнении эффективности тепловых насосов на основе их значений COP заключается в том, что они дают нереалистичные ожидания в отношении производительности теплового насоса, поскольку показывают эффективность только в пиковых условиях [9, 10]. Так, например, в зимнее время, когда температура наружного воздуха падает, эффективность воздушного теплового насоса также снижается, поскольку на их работу используется больше электроэнергии для поддержания нормальной температуры в обогреваемом помещении [11-14]. В связи с этим, рациональнее сравнивать эффективность тепловых насосов на основе их сезонного коэффициента COP. В этом случае COP позволяет получить достоверную информацию об эффективности теплового насоса, поскольку учитывает сезонные изменения и дает среднее значение за весь год [15].

Постановка задачи. В связи с вышесказанным возникает необходимость проведения экономической оценки и обоснования целесообразности использования низкотемпературных воздушных тепловых насосов системы «воздух-вода» в климатических условиях, характерных для таких областей, как Ярославская, Ивановская, Костромская, Владимирская и т.п.

Методы исследования. Для оценки энергетической и экономической эффективности применения низкотемпературных воздушных тепловых насосов системы «воздух-вода» использовалось следующее математическое описание [16, 17]:

$$Q_{\text{ЭН}}^{\text{общ}} = Q_{\text{ЭН}}^{\text{ВТН}} + Q_{\text{ЭН}}^{\text{ТЭН}}, \quad (1)$$

где: $Q_{\text{ЭН}}^{\text{общ}}$ – энергопотребление теплонасосной системы теплоснабжения, $Q_{\text{ЭН}}^{\text{ВТН}}$ – энергопотребление тепловым насосом, $Q_{\text{ЭН}}^{\text{ТЭН}}$ – энергопотребление электротеном.

Объект исследования – бревенчатый жилой дом площадью 100 м² со средними тепловыми потерями 2 Вт/м² и воздушный тепловой насос Meeting в режиме A10/W30 и A10/W55, конструктивно приспособленный к атмосферным условиям рассматриваемых регионов с выходной тепловой мощностью 7 кВт, электрической мощностью 1,75 кВт с буферной емкостью теплоносителя объемом 300 л. Рассматриваемый диапазон температур от -30 до +20⁰С. С экспериментальной точки зрения рассматривались два режима:

напольная система отопления помещения (A10/W30) и система с нагревом воды для нужд горячего водоснабжения (A10/W50). Оба случая характеризуются наличием буферной емкости. Для оценки производительности и эффективности теплового насоса определялся коэффициент трансформации COP.

Так как продолжительность периодов с наиболее низкой температурой в течение отопительного периода в рассматриваемых регионах незначительна, экономически целесообразно проектировать дорогостоящие тепловые насосы на покрытие всей расчетной тепловой нагрузки. В связи с этим наиболее рациональным будет применение универсальной схемы теплоснабжения с учетом дополнительного электротена, программно-интегрированного в схему воздушного теплового насоса.

Обсуждение результатов. В табл. 1 приведены показатели тепловых потерь и расхода электрической энергии для функционирования воздушного теплового насоса (ВТН) при среднесуточной температуре $-2,5^{\circ}\text{C}$.

Таблица 1. Показатели необходимого энергопотребления за отопительный период
Table 1. Indicators of required energy consumption during the heating period

$t_{\text{наруж.}}$, $^{\circ}\text{C}$	Продолжительность отопительного периода, час. Duration of the heating period, hour.	ВТН A10/W50		ВТН A10/W30	
		$Q_{\text{эн.}}^{\text{общ.}}$, кВт/ч	$\text{COP}_{\text{расч.}}$	$Q_{\text{эн.}}^{\text{общ.}}$, кВт/ч	$\text{COP}_{\text{расч.}}$
-30	37	302,48	1,32	172,98	2,31
-25	49	351,58	1,37	180,08	2,67
-20	59	364,33	1,43	157,83	3,29
-15	276	1428,30	1,51	478,40	4,50
-10	918	3832,65	1,63	1387,20	4,50
-5	1135	3603,63	1,83	1462,89	4,50
0	1158	2518,65	2,21	1235,20	4,50
5	580	881,60	2,50	489,78	4,50
10	285	319,20	2,50	177,33	4,50
15	243	145,80	3,00	87,48	5,00
20	60	13,71	3,50	8,73	5,50
Итого	4800	13761,91	1,85	5837,882	4,35

При расчетах важно помнить, что основой работы теплового насоса является воздух, температура которого в течение суток может падать на несколько десятков градусов. При определении мощности теплового насоса для отопления дома на основании средней температуры можно получить значение потребления энергии выше, чем заявлено у производителя.

В связи с этим, рациональнее проводить расчеты для каждого месяца отопительного сезона отдельно учитывая количество дней, что позволит экономить расход электроэнергии. Для расчетов значения средней температуры, характерные для любого региона, и иные параметры принимаются согласно СП 131.13330 «Строительная климатология» и СП 60.13330. «Отопление, вентиляция и кондиционирование».

С целью эффективного использования воздушных тепловых насосов важно правильно подобрать тепловую мощность, соблюдая условие:

$$P_{\text{тепл.моц}} \geq Q_{\text{потери}} \quad (2)$$

При низких температурах тепловые насосы обладают низкой производительностью, требуя дополнительную мощность. С экономической точки зрения рационален вариант использования воздушного теплового насоса в осенне-весенний период, и зимой в комбинации с дополнительным источником энергии.

Общие теплотери зданий $Q_{\text{потери}}$ при различной температуре наружного воздуха $t_{\text{нар.возд.}}$ рассчитываются по формуле:

$$Q_{\text{потери}} = S \cdot q \cdot (t_{\text{помещ.}} - t_{\text{нар.возд.}}), \quad (3)$$

где: S – площадь здания, м^2 ; q – теплотери, $\text{кВт}/\text{м}^2$; $t_{\text{помещ.}}$ – температура внутри помещения, $^{\circ}\text{C}$.

Зная общие теплопотери здания $Q_{\text{потери}}$ и продолжительность отопительного периода T можно рассчитать расход общего количества теплоты, необходимой для обогрева здания:

$$Q_{\text{тепл.}}^{\text{общ.}} = Q_{\text{потери}} \cdot T. \quad (4)$$

Эффективность сезонной работы воздушного теплового насоса оценивается показателем $COP_{\text{расч.}}$, представленным в табл. 1. Таким образом, на основании расчетных значений табл. 1 можно определить сколько энергии универсальная система позволяет сэкономить за отопительный период. На рис. 1 представлены полученные расчетные значения энергопотребления и теплоотдачи при комбинированной системе теплоотдачи.

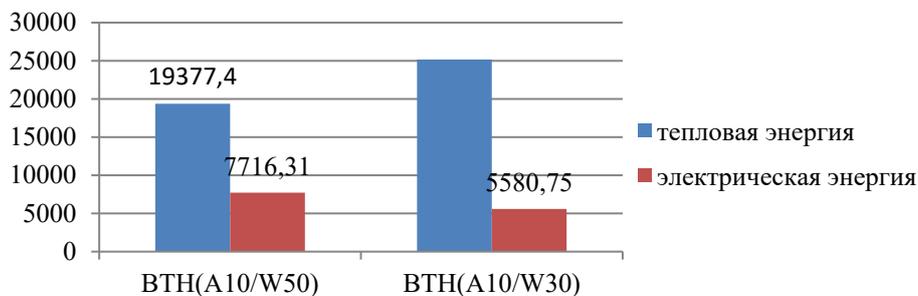


Рис. 1. Энергопотребление и теплоотдача при комбинированной системе теплоснабжения, кВт/ч

Fig. 1. Energy consumption and heat transfer with a combined heat supply system, kW/h

При использовании комбинированной теплонасосной системы теплоснабжения VHP 7 кВт A10/W50 экономия за отопительный период составила 45,9% по сравнению с электрическим отоплением. Из сэкономленной электроэнергии 56,1% пришлось на воздушный тепловой насос и 43,9% на ТЭН (рис. 2). При сравнении электрического отопления и комбинированной теплонасосной системы теплоснабжения VHP 7 кВт A10/W30 экономия составила 77%, при этом сэкономленная электроэнергия составила 95,6% и 4,4% на ТЭН.

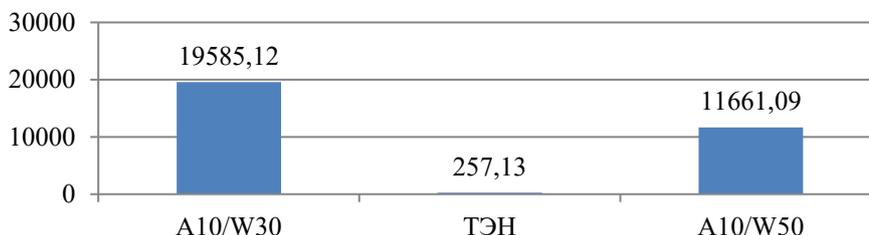


Рис. 2. Экономия энергопотребления VHP при комбинированных режимах теплоснабжения за отопительный период, кВт/ч

Fig. 2. Savings in energy consumption of VHP under combined heat supply modes during the heating period, kW/h

Также стоит отметить, что использование VHP 7 кВт A10/W30 в совокупности с системой отопления «теплый пол» позволяет добиться более высоких показателей экономии электроэнергии по сравнению с VHP 7 кВт A10/W50. При этом потребление электроэнергии снизится в 2,4 раза при совместном энергопотреблении VHP и ТЭН, а расход электроэнергии, потребленной только ТЭН, уменьшится в 23,5 раза, так как основная нагрузка придется на VHP. При этом средние расчетные значения COP за отопительный период будут приближенными к паспортным значениям.

Так, например, при использовании системы теплоснабжения VHP 7 кВт A10/W30 значения паспортного и расчетного COP совпадут при температуре равной -15°C , а при VHP 7 кВт A10/W50 расчетные значения COP приблизятся к паспортным значениям при $+5^{\circ}\text{C}$. Чем выше показатель COP , тем меньше финансовые затраты.

Следует отметить, что выходная тепловая мощность воздушного теплового насоса зависит от объема хладагента, от площади поверхности змеевиков в испарителе и конденсаторе т.д. В связи с этим часто для подобных расчетов тепловой мощности удобнее

использовать специально написанные расчетные программы, способные учитывать действие многих факторов.

Вывод. На основе полученных результатов исследований можно сделать вывод о преимуществе отопления помещений воздушным тепловым насосом с комбинированным режимом работы. Применение воздушных тепловых насосов при отрицательных температурах окружающего воздуха экономически целесообразно. Основное влияние на эксплуатационные затраты теплового насоса имеет максимально возможное снижение температуры в отопительном контуре помещения. С возрастающей температурой воды в отопительном контуре уменьшается значение COP ВТН и, тем самым, возрастают эксплуатационные расходы.

Дальнейшие исследования наиболее целесообразны в области использовании комбинированного режима работы ВТН с внесением в его устройство конструктивных изменений - смесительной камеры и рекуператора.

Применение эффектов рециркуляции и рекуперации воздуха позволит обеспечить максимально комфортные условия микроклимата в помещении, а также добиться минимизации затрат на работу ТЭН, подключаемого только в период низких температур наружного воздуха.

Библиографический список:

1. Филиппов, С.П. Перспективы применения тепловых насосов в России / С.П. Филиппов, М.Д. Дильман, М.С. Ионов // Энергосовет. - 2011. - № 5 (18). - С. 42-45.
2. Il'ina, T.N. Efficiency of Operation of Air Heat Pumps with Evaporators of Various Designs/ T.N. Il'ina, P.A. Orlov, A.O. Echina // Proceedings of the Southwest State University. - 2023. - № 2(27). - С. 62-74. DOI: 10.21869/2223-1560-2023-27-2-62-76
3. Сапрыкина, Н.Ю. Повышение эффективности работы систем теплоснабжения и кондиционирования, работающих в комплексе с тепловым насосом // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. - 2018. - № 2 (24). - С. 17-23.
4. Яковлев, И.В. Эффективность применения тепловых насосов типа «воздух-вода» в климатических условиях России / И.В. Яковлев, А.М. Исхакова // Теплоэнергетика. - 2020. - № 10. - С. 38-47. DOI: 10.1134/S0040363620100100
5. Федяев, А.А. Эффективность использования тепловых насосов в условиях крайнего севера / А.А. Федяев, Н.Н. Михолап, В.Н. Федяева // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. - 2014. - Т. 1. - С. 41-46.
6. Шулепина, П.А. Эффективность применения парокомпрессионного теплового насоса / П.А. Шулепина, А.А. Михайлова, В.А. Алексеев // Modern Science. - 2021. - № 8. - С. 224-229.
7. Дерягин, В.В. Эффективность работы тепловых насосов // Тенденции развития науки и образования. - 2022. - № 85-1. - С. 98-100. DOI: 10.18411/trnio-05-2022-28
8. Агафонов, М.К. Сравнение эффективности использования теплового насоса и газового котла для отопления жилого здания / М.К. Агафонов, К.Е. Алексеев, Г.А. Кузнецова // Градостроительство. Инфраструктура. Коммуникации. - 2022. - № 2 (27). - С. 21-26.
9. Юнусов, Э.Ш. Эффективность теплоснабжения с использованием комбинированного теплового насоса / Э.Ш. Юнусов, А.С. Гаврилов // StudNet. - 2022. - № 6(5). - С. 102-106.
10. Федотов, А.С. Повышение эффективности теплового насоса // Научно-исследовательский центр «Science Discovery». - 2022. - № 10. - С. 627-631.
11. Сапрыкина, А.С. Исследование работы теплового насоса и его эффективность при различных режимах // Перспективы развития строительного комплекса. - 2017. - № 1. - С. 31-35.
12. Филиппов, С.П. Эффективность использования тепловых насосов для теплоснабжения малоэтажной застройки / С.П. Филиппов, М.Д. Дильман, М.С. Ионов // Теплоэнергетика. - 2011. - № 11. - С. 12-19.
13. Обьедкова, О.И. Эффективность применения тепловых насосов / О.И. Обьедкова, И.С. Кондратов, А.С. Семенов // Современные наукоемкие технологии. - 2013. - № 8-1. - С. 43-44.
14. Жарков, Т.А. Об эффективности и окупаемости тепловых насосов // Сантехника, Отопление, Кондиционирование. - 2015. - № 5 (161). - С. 62-64.
15. Лунева, С.К. Исследование эффективности функционирования теплового насоса / С.К. Лунева, А.Г. Лепеш // Техничко-технологические проблемы сервиса. - 2015. - № 4 (34). - С. 30-35.
16. Крушнов, Е.И. Методические аспекты оптимизации затрат энергопотребления малоэтажных строений со встроенным воздушным тепловым насосом / Е.И. Крушнов, И.А., С.А. Логинова, И.С. Зайцев // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. - 2023. - № 2 (50). - С. 177-187. DOI: 10.21822/2073-6185-2023-50-2-177-187

17. Федосов, С.В. Эффективное энергоснабжение малоэтажных строений воздушным тепловым насосом / С.В. Федосов, В.Н. Федосеев, А.Б. Петрухин // БСТ. – 2020. - №2. – С. 50–53.

References:

1. Filippov S.P., M.D. Dilman, M.S. Ionov. Prospects for the Application of Heat Pumps in Russia. *Energosovet*. 2011; 5 (18):42-45. (In Russ)
2. Iina T.N., P.A. Orlov, A.O. Echina. Efficiency of Operation of Air Heat Pumps with Evaporators of Various Designs. *Proceedings of the Southwest State University*. 2023; 2 (27):62-74. DOI: 10.21869/2223-1560-2023-27-2-62-76
3. Saprykina N.Yu. Improving the efficiency of heat supply and air conditioning systems operating in combination with a heat pump. *Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region*. 2018;2 (24):17-23.
4. Yakovlev I.V., A.M. Iskhakova. Efficiency of using air-to-water heat pumps in the climatic conditions of Russia. *Thermal Power Engineering*. 2020;10:38-47. DOI: 10.1134/S0040363620100100(In Russ)
5. Fedyayev A.A., N.N. Mikholaip, V.N. Fedyayeva. Efficiency of using heat pumps in the conditions of the far north. *Transactions of Bratsk State University. Series: Natural and Engineering Sciences*. 2014;1:41-46. (In Russ)
6. Shulepina P.A., A.A. Mikhailova, V.A. Alekseev. Efficiency of using a vapor compression heat pump. *Modern Science*. 2021; 8: 224-229.
7. Deryagin, V.V. Efficiency of heat pumps. *Trends in the development of science and education*. 2022; 85(1): 98-100. DOI: 10.18411/trnio-05-2022-28 (In Russ)
8. Agafonov M.K., K.E. Alekseev, G.A. Kuznetsova. Comparison of the efficiency of using a heat pump and a gas boiler for heating a residential building. *Urban development. Infrastructure. Communications*. 2022; 2 (27):21-26. (In Russ)
9. Yunusov E.Sh., A.S. Gavrilov. Efficiency of heat supply using a combined heat pump.. *StudNet*. 2022; 6 (5):102-106. (In Russ)
10. Fedotov, A.S. Increasing the efficiency of the heat pump. *Research Center "Science Discovery"*. 2022;10: 627-631. (In Russ)
11. Saprykina, A.S. Study of the operation of the heat pump and its efficiency under various modes. *Prospects for the development of the construction complex*. 2017; 1:31-35. (In Russ)
12. Filippov, S.P. Efficiency of using heat pumps for heating low-rise buildings / S.P. Filippov, M.D. Dilman, M.S. Ionov. *Heat Power Engineering*. 2011;11:12-19. (In Russ)
13. Obyedkova, O.I. Efficiency of using heat pumps / O.I. Obyedkova, I.S. Kondratov, A.S. Seminenko. *Modern science-intensive technologies*. 2013;8(1):43-44. (In Russ)
14. Zharkov, T.A. On the efficiency and payback of heat pumps. *Plumbing, Heating, Air Conditioning*. 2015; 5 (161):62-64. (In Russ)
15. Luneva, S.K. Study of the efficiency of heat pump operation / S.K. Luneva, A.G. Lepesh. *Technical and technological problems of service*. 2015; 4 (34):30-35. (In Russ)
16. Krupnov E.I., I.A., S.A. Loginova, I.S. Zaitsev. Methodological aspects of optimization of energy consumption costs of low-rise buildings with a built-in air heat pump. *Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Sciences*. 2023;2(50):177-187. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-2-177-187(In Russ)
17. Fedosov, S.V. Efficient energy supply of low-rise buildings with an air heat pump. S.V. Fedosov, V.N. Fedoseyev, A.B. Petrukhin. *BST*. 2020; 2:50–53. (In Russ)

Сведения об авторах:

Крупнов Евгений Иванович, кандидат технических наук, заведующий кафедрой строительства и инженерных систем; ekrup@list.ru

Зайцева Ирина Александровна, кандидат экономических наук, доцент, магистр кафедры строительства и инженерных систем; 75zss@rambler.ru

Логинава Светлана Андреевна, кандидат технических наук, заведующий кафедрой строительства зданий и сооружений; sl79066171227@yandex.ru

Симагин Александр Владимирович, инженер по эксплуатации теплотехнического оборудования 1 категории; sanya_sema1580@mail.ru

Information about authors:

Evgeny I. Krupnov, Cand. Sci. (Eng.), Head of the Department of Construction and Engineering Systems; ekrup@list.ru

Irina A. Zaytseva, Cand. Sci. (Econom.), Assoc. Prof., Master of the Department of Construction and Engineering Systems; 75zss@rambler.ru

Svetlana A. Loginova, Cand. Sci. (Eng.), Head of the Department of Construction of Buildings and Structures; sl79066171227@yandex.ru

Aleksandr V. Simagin, Engineer for Operation of Heat Engineering Equipment of the 1st Category; sanya_sema1580@mail.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/ Received 22.06.2024.

Одобрена после рецензирования / Reved 27.07.2024.

Принята в печать /Accepted for publication 27.07.2024.

**Влияние средневзвешенного диаметра шара на размер частиц
конечного продукта**

А.А. Крутилин, Ф.П. Потапов, Н.А. Инькова, О.К. Пахомова

Волгоградский государственный технический университет (Себряковский филиал),
403343, Волгоградская обл., г. Михайловка, ул. Мичурина, 21, Россия

Резюме. Цель. В настоящее время измельчение цемента в мельницах осуществляется до удельной поверхности 2500-3000 и 3500-4500 см²/г и более. Дальнейшее измельчение клинкера резко ухудшает свойства получаемой продукции. Актуальность темы обусловлена повышенным интересом к снижению материальных и энергетических затрат в процессе измельчения клинкера. Целью исследования является изучение влияния различного ассортимента мелющих тел и средневзвешенного диаметра шара на размер частиц конечного продукта, выполняя анализ размера частиц путем дифракции частиц. **Метод.** Для получения достоверных экспериментальных данных использовалась специально разработанная модель помольного агрегата. Анализ размера частиц путем их дифракции или пространственного распределения (спектра рассеяния) рассеянного света, осуществлялся с помощью лазерного анализатора. **Результат.** Разработана методика исследований, отвечающая современным возможностям техники эксперимента. Проведены экспериментальные исследования по измельчению клинкера в лабораторной мельнице. Определено совместное влияние различного ассортимента мелющих тел и средневзвешенного диаметра шара на размер частиц конечного продукта. **Вывод.** Исследования кривых конечного продукта, полученного при использовании различного средневзвешенного диаметра шара, показали, что для измельчения мелких зерен не требуется большой энергии удара, диаметр мелющих тел должен снижаться по мере уменьшения размера зерен материала. Поэтому шары должны быть минимального диаметра, но достаточного для разрушения частиц материала.

Ключевые слова: дифракция частиц, лазерный анализатор, конечный продукт, клинкер, помол, средневзвешенный диаметр шара, мельница периодического действия

Для цитирования: А.А.Крутилин, Ф.П. Потапов, Н.А. Инькова, О.К. Пахомова. Влияние средневзвешенного диаметра шара на размер частиц конечного продукта. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2024;51(3):195-201. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-3-195-201

**The influence of the weighted average diameter of the ball on the particle size
of the final product**

A.A. Krutilin, F.P. Potapov, N.A. Inkova, O.K. Pakhomova

Volgograd State Technical University (Sebryakov Branch),
21 Michurina Str., Volgograd region, Mikhailovka 403343, Russia

Abstract. Objective. Currently, cement is crushed in mills to a specific surface area of 2500-3000 and 3500-4500 cm²/g or more. Further grinding of clinker sharply worsens the properties of the resulting product. The relevance of the topic is due to the increased interest in reducing material and energy costs in the process of clinker grinding. The purpose of the work is to study the effect of different assortment of grinding media and weighted average ball diameter on the particle size of the final product, performing particle size analysis by particle diffraction. **Method.** To obtain reliable experimental data, a specially developed model of the grinding unit was used. Analysis of particle size by diffraction or spatial distribution (scattering spectrum) of scattered light was carried out using a laser analyzer. **Result.** A research methodology has been

developed that meets the modern capabilities of experimental technology. Experimental studies have been conducted on clinker grinding in a laboratory mill. The combined effect of different assortments of grinding bodies and the average weighted diameter of the ball on the particle size of the final product has been determined. **Conclusion.** Studies of the curves of the final product obtained using different weighted average ball diameters have shown that large impact energy is not required to grind small grains; the diameter of the grinding bodies should decrease as the grain size of the material decreases. Therefore, the balls must have a minimum diameter, but sufficient to destroy the particles of the material.

Keywords: particle diffraction, laser analyzer, final product, clinker, grinding, weighted average ball diameter, batch mill

For citation: A.A. Krutilin, F.P. Potapov, N.A. Inkova, O.K. Pakhomova. The influence of the weighted average diameter of the ball on the particle size of the final product. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2024;51(3):195-201. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-3-195-201

Введение. В настоящее время измельчение цемента в мельницах осуществляется до удельной поверхности 2500-3000 и 3500-4500 см²/г и более. Дальнейшее измельчение клинкера резко ухудшает свойства получаемой продукции.

Актуальность темы обусловлена повышенным интересом к снижению материальных и энергетических затрат в процессе измельчения клинкера и получения цемента, соответствующего технологическим требованиям.

Постановка задачи. Целью исследования является изучение влияния различного ассортимента мелющих тел и средневзвешенного диаметра шара на размер частиц конечного продукта, выполняя анализ размера частиц путем дифракции частиц.

Для достижения цели исследования были определены задачи:

1. Провести экспериментальные исследования по измельчению клинкера в лабораторной мельнице.
2. Определить совместное влияние различного ассортимента мелющих тел и средневзвешенного диаметра шара на размер частиц конечного продукта.
3. Исследовать зерновой состав цемента.
4. Сформулировать соответствующие выводы по результатам проведенного исследования.

Для получения достоверных экспериментальных данных использовалась специально разработанная модель помольного агрегата (рис. 1) и разработана методика исследований, отвечающая современным возможностям техники эксперимента.



Рис.1. Модель помольного агрегата
Fig. 1. Grinding unit model

Анализ размера частиц путем дифракции частиц или пространственного распределения (спектра рассеяния) рассеянного света, осуществлялся с помощью лазерного анализатора.

На рис. 2 представлено распределение частиц конечного продукта, полученного при использовании средневзвешенного диаметра шара 25 мм.

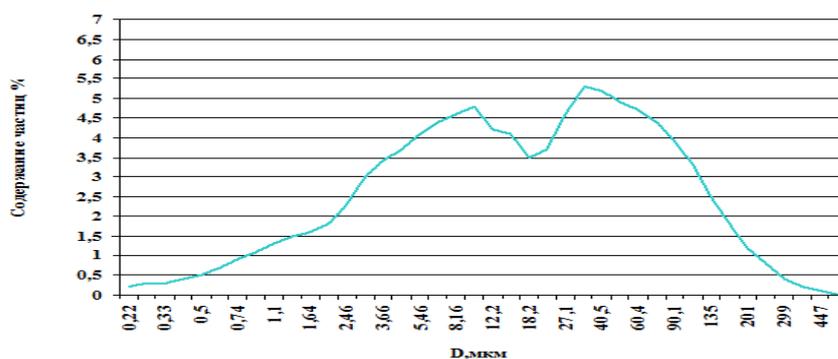


Рис. 2. Зависимость содержания частиц конечного продукта от размера

Fig. 2. Dependence of the particle content of the final product on size

Как видно из рис. 2 кривая имеет два ярко выраженных пика. Первый пик представлен фракциями от 0,22 мкм до 14 мкм. Вершина данного пика образована максимальным содержанием частиц 4,8%. Масса частиц данного пика составляет 49,3%.

Второй пик представлен фракциями от 22 и до 555 мкм. Максимальное содержание частиц данного пика представлено вершиной с содержанием частиц 5,3%. Масса частиц данного пика составляет 43,6%.

На рис. 3 представлено распределение частиц конечного продукта, полученного при использовании средневзвешенного диаметра шара 33 мм.

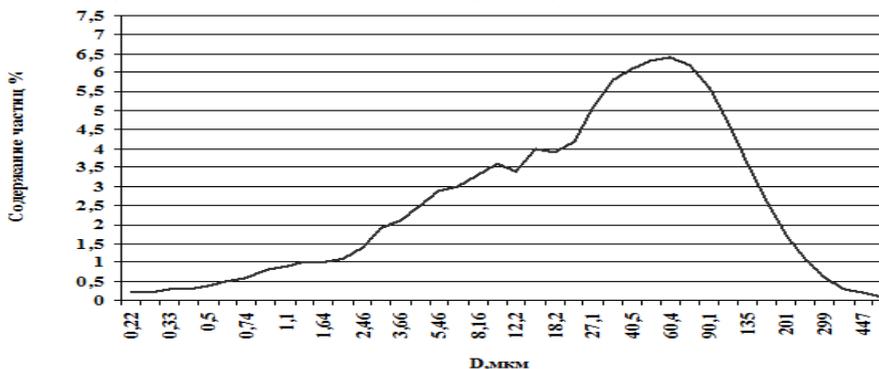


Рис. 3. Зависимость содержания частиц конечного продукта от размера

Fig. 3. Dependence of the particle content of the final product on size

Первый пик представлен фракциями от 0,22 мкм до 12,2 мкм. Вершина данного пика образована максимальным содержанием частиц 3,6%. Масса частиц данного пика составляет 31,4%.

Второй пик представлен фракциями от 12,2 и до 18,2 мкм. Максимальное содержание частиц данного пика представлено вершиной с содержанием частиц 4%. Масса частиц данного пика составляет 7,9%. Разделяющей этих двух пиков служит фракцией 12,2 мкм с содержанием частиц 3,4%.

Третий пик представлен фракциями от 18,2 и до 555 мкм. Максимальное содержание частиц данного пика представлено вершиной с содержанием частиц 6,4%. Масса частиц данного пика составляет 60,7%. Разделяющей второго и третьего пиков служит фракцией 18,2 мкм с содержанием частиц 3,9%. Содержание тонкой фракции размером (-5 мкм) равно 15,1%. Содержание средней фракции размером (+5 -30 мкм) равно 33,5%.

На рис. 4 представлено распределение частиц конечного продукта, полученного при использовании средневзвешенного диаметра шара 34 мм.

Первый пик представлен фракциями от 0,22 мкм до 12,2 мкм. Вершина данного пика образована максимальным содержанием частиц 3,7%. Масса частиц данного пика составляет 33,1%.

Второй пик представлен фракциями от 12,2 и до 18,2 мкм. Максимальное содержание частиц данного пика представлено вершиной с содержанием частиц 3,7%. Масса частиц данного пика составляет 8,3%. Разделяющей этих двух пиков служит фракцией 12,2 мкм с содержанием частиц 3,3%.

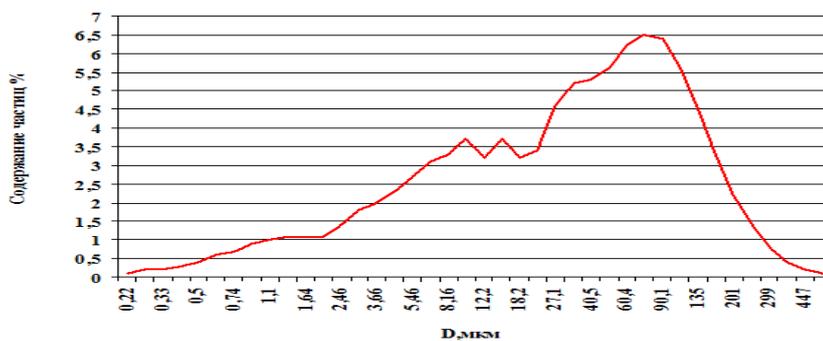


Рис. 4. Зависимость содержания частиц конечного продукта от размера

Fig. 4. Dependence of the particle content of the final product on size

Третий пик представлен фракциями от 18,2 и до 555 мкм. Максимальное содержание частиц данного пика представлено вершиной с содержанием частиц 6,5%. Масса частиц данного пика составляет 63,2%. Разделяющей второго и третьего пиков служит фракцией 18,2 мкм с содержанием частиц 3,3%. На рис. 5 представлено распределение частиц конечного продукта, полученного при использовании средневзвешенного диаметра шара 35 мм.

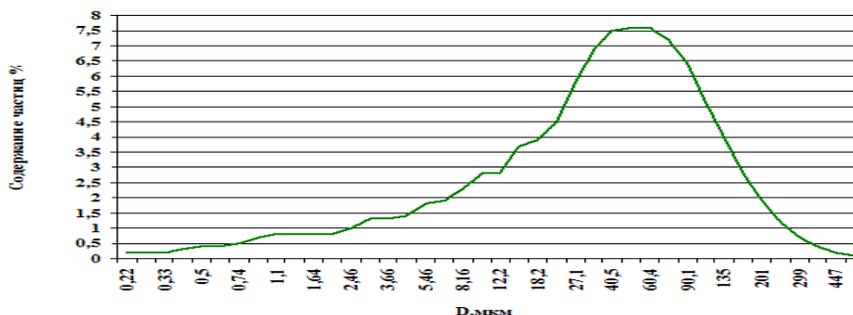


Рис. 5. Зависимость содержания частиц конечного продукта от размера

Fig.5. Dependence of the particle content of the final product on size

Как видно из рис. 5 кривая имеет один ярко выраженный пик. Основная масса (более 90%) частиц представлена фракциями от 2 до 555 мкм, с максимальным содержанием фракции 44,5 – 54,3 мкм 7,6%. Содержание тонкой фракции размером (-5мкм) равно 11%. Содержание средней фракции размером (+5 -30мкм) равно 29,4%.

Обсуждение результатов. Анализ ранее полученных данных (рис. 6) показывает, что во всех случаях после помола характер кривых содержания частиц конечного продукта остается неизменным, наблюдается лишь сужение диапазонов размеров частиц, за счет исчезновения наиболее мелкой фракции, а также происходит перераспределение частиц по размерам.

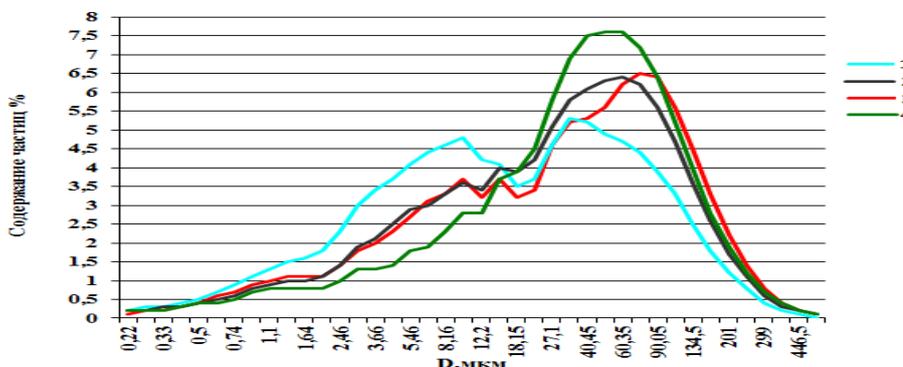


Рис. 6. Зависимости содержания частиц конечного продукта от размера: 1 - средневзвешенный диаметр шарам - 25 мм; 2 - средневзвешенный диаметр шарам - 33 мм; 3 - средневзвешенный диаметр шара - 34 мм; 4- средневзвешенный диаметр шара - 35 мм

Fig. 6. Dependence of the particle content of the final product on size: 1 - weighted average diameter of the balls - 25 mm; 2 - weighted average diameter of the balls - 33 mm; 3 - weighted average diameter of the ball - 34 mm; 4- weighted average ball diameter - 35 mm

Для того чтобы лучше проследить влияние различного средневзвешенного диаметра шара на размер частиц конечного продукта, кривые, представленные на рис. 6 были разбиты на два интервала.

Первый интервал представлен фракциями от 0,22 мкм до 18,15 мкм. Как видно все кривые имеют один четко выраженный пик.

Следует обратить внимание, на значительный рост содержания частиц (кривая 1). Вершина данного пика образована максимальным содержанием частиц 4,8% размером 10,18 мкм. Кривые 2 и 3 имеют одинаковый характер роста. Вершина пика, образованная максимальным содержанием частиц 4% размером 12,2 мкм (кривая 2). Вершина пика, образованная максимальным содержанием частиц 3,7% размером 8,16 мкм (кривая 3).

Максимальное содержание частиц (кривая 4) 3,8% размером 18,15 мкм.

Проанализировав характер поведения всех кривых на данном интервале, можно сделать вывод, что с увеличением средневзвешенного диаметра шаров, содержание мелких частиц снижается.

Второй интервал представлен фракциями от 18,15 мкм до 555 мкм. Как видно все кривые имеют также один четко выраженный пик.

Следует обратить внимание, на значительный рост содержания частиц (кривая 4). Вершина данного пика образована максимальным содержанием частиц 7,6% размером 60,35 мкм.

Кривые 2 и 3 имеют одинаковое максимальное содержание частиц в области 6,5%. Вершина пика кривой 2 образована частицами размером 50,2 мкм, кривой 3 – 75,2 мкм.

Минимальное содержание частиц в данном интервале наблюдается у кривой 1, вершина пика образована максимальным содержанием частиц 5,4% размером 27,1 мкм.

Снижение значения содержания частиц кривой 1 на данном интервале можно объяснить тем, что измельчающая загрузка со средневзвешенным диаметром шара равным 25 мм подобрана с учетом кинетической энергии мелющих тел, в основном состоит из мелких шаров, что создает более плотную упаковку по сравнению с загрузкой из крупных шаров. Состав данной шаровой загрузки улучшает процесс измельчения частиц размером от 0,22 до 18,15 мкм за счет повышения попадания зерен измельчаемого материала под удар мелющих тел.

Вывод. Исследования кривых конечного продукта, полученного при использовании различного средневзвешенного диаметра шара, показали:

1. Для измельчения мелких зерен не требуется большой энергии удара, диаметр мелющих тел должен снижаться по мере уменьшения размера зерен материала. Поэтому шары должны быть минимального диаметра, но достаточного для разрушения частиц материала.

2. За счет снижения содержания крупных шаров можно улучшить процесс измельчения и повысить производительность мельницы.

3. Шаровая мельница работает эффективнее, если по длине её камеры создано соответствие между размером зерен измельчаемого материала и диаметром мелющих тел.

4. Применение мелких шаров свидетельствует о том, что процесс измельчения ударом в точках соприкосновения мелких шаров эффективен.

Библиографический список:

1. Барбанягрэ В.Д., Стронин А.А. Исследование влияния диаметра крупного шара в мелющей загрузке мельницы открытого цикла на дисперсные характеристики клинкера. Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2018. № 5. С. 60-65.
2. Будникова В.С. Использование интенсификаторов помола для получения цементов. В сборнике: Образование, наука, производство. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. 2015. С. 26-29.
3. Вайтехович П.Е., Семенов Д.В. Влияние взаимодействия между мелющими телами на характер их движения в планетарной мельнице. Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2010. № 9. С. 13-15.

4. Герасимов М.Д., Латышев С.С., Богданов Н.Э., Локтионов И.О. Обзор конструктивных решений в области создания помольных мельниц. В сборнике: Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов. Межвузовский сборник статей. Под редакцией В.С. Богданова. Белгород, 2018. С. 132-146.
5. Жуков В.П., Мизонов В.Е. Оптимальное распределение размеров мелющих тел по длине барабанных мельниц. Теоретические основы химической технологии. 1995. Т. 29. № 6. С. 646-650.
6. Жуков В.П., Ушаков С.Г. Оптимальное распределение по крупности мелющих тел в барабанных мельницах в сборнике: интенсификация процессов механической переработки сыпучих материалов. Межвузовский сборник научных трудов. Иваново, 1987. С. 40-43.
7. Козловский В.И., Вайтехович П.Е., Камлюк Т.В. Влияние размера мелющих тел на эффективность диспергирования материала в шаровой мельнице с мешалкой. Труды БГТУ. №3. Химия и технология неорганических веществ. 2016. № 3 (185). С. 136-141.
8. Коновалов Д.А. Изучение влияния ассортимента мелющих тел на основные дисперсионные показатели цемента и его свойства. В сборнике: Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. С. 197-201.
9. Малышев В.П., Бектурганов Н.С., Макашева А.М., Зубрина Ю.С. Вероятностная модель измельчения материалов как оператор самоорганизации и аттрактор процесса. Цветные металлы. 2016. № 2 (878). С. 33-39.
10. Малышев В.П., Зубрина Ю.С., Юн А.Б., Синянская О.М. Адаптация вероятностной модели измельчения к работе шаровых барабанных мельниц. Цветные металлы. 2017. № 10. С. 17-24.
11. Несмеянов Н.П., Синцов Д.И., Бузаджи И.С. Интенсификация процесса помола в трубных мельницах. В сборнике: Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов. Межвузовский сборник статей. Под ред. В.С. Богданова. Белгород, 2014. С. 185-187.
12. Потапов Ф.П. Интенсификация процесса помола в шаровых барабанных мельницах. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Белгород, 2011
13. Сталинский Д.В., Рудюк А.С., Солёный В.К. Эффективность использования мелющих шаров малого диаметра для помола цемента. Сталь. 2022. № 6. С. 15-19.
14. Ханин С.И., Старченко Д.Н. Закономерности процесса движения мелющих тел в корпусе шаровой барабанной мельницы. Монография / Белгород, 2013.
15. Шарапов Р.Р. Научные основы создания технологических систем помола цемента на основе шаровых мельниц замкнутого цикла. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Белгород, 2009
16. Шарапов Р.Р. Научные основы создания технологических систем помола цемента на основе шаровых мельниц замкнутого цикла. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Белгород, 2009
17. Шарапов Р.Р. Эффективность помольных систем замкнутого цикла на базе шаровых мельниц. В сборнике: Актуальные проблемы строительной отрасли и образования. Сборник докладов Первой Национальной конференции. 2020. С. 277-282.
18. Шахова Л.Д., Черкасов Р.А. Интенсификация процесса измельчения клинкера с применением интенсификаторов помола. Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2014. № 4. С. 148-152.

References:

1. Barbanyagre V.D., Stronin A.A. Study of the influence of the diameter of a large ball in the grinding charge of an open circuit mill on the dispersion characteristics of clinker. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after. V.G. Shukhova*. 2018; 5:60-65.(In Russ)
2. Budnikova V.S. Use of grinding intensifiers for the production of cements. In the collection: Education, science, production. *Belgorod State Technological University named after. V.G. Shukhova*. 2015; 26-29. (In Russ)
3. Vaitekhovich P.E., Semenenko D.V. The influence of interaction between grinding bodies on the nature of their movement in a planetary mill. *Chemical and oil and gas engineering*. 2010;9:13-15. .(In Russ)
4. Gerasimov M.D., Latyshev S.S., Bogdanov N.E., Loktionov I.O. Review of design solutions in the field of grinding mills. In the collection: Energy-saving technological complexes and equipment for the production of building materials. *Interuniversity collection of articles. Edited by V.S. Bogdanov*. Belgorod, 2018;132-146. (In Russ)
5. Zhukov V.P., Mizonov V.E. Optimal distribution of grinding media sizes along the length of drum mills. *Theoretical foundations of chemical technology*. 1995;29(6):646-650.(In Russ)

6. Zhukov V.P., Ushakov S.G. Optimal size distribution of grinding media in drum mills in a collection: intensification of processes of mechanical processing of bulk materials. *Interuniversity collection of scientific papers*. Ivanovo, 1987;40-43. (In Russ)
7. Kozlovsky V.I., Vaitekhovich P.E., Kamlyuk T.V. The influence of the size of grinding media on the efficiency of material dispersion in a ball mill with a stirrer. *Proceedings of BSTU. No. 3. Chemistry and technology of inorganic substances*. 2016;3 (185):136-141.(In Russ)
8. Kononov D.A. Study of the influence of an assortment of grinding media on the main dispersion parameters of cement and its properties. In the collection: International scientific and technical conference of young scientists of BSTU named after. V.G. Shukhova. 2017;197-201.(In Russ)
9. Malyshev V.P., Bekturganov N.S., Makasheva A.M., Zubrina Yu.S. Probabilistic model of materials grinding as a self-organization operator and process attractor. *Non-ferrous metals*. 2016;2 (878):33-39.(In Russ)
10. Malyshev V.P., Zubrina Yu.S., Yun A.B., Sinyanskaya O.M. Adaptation of a probabilistic grinding model to the operation of ball drum mills. *Non-ferrous metals*. 2017;10:17-24.(In Russ)
11. Nesmeyanov N.P., Sintsov D.I., Buzadzhi I.S. Intensification of the grinding process in tube mills. In the collection: Energy-saving technological complexes and equipment for the production of building materials. *Interuniversity collection of articles*. Ed. V.S. Bogdanov. Belgorod, 2014;185-187.(In Russ)
12. Potapov F.P. Intensification of the grinding process in ball drum mills. Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences. *Belgorod State Technological University named after. V.G. Shukhova*. Belgorod, 2011.(In Russ)
13. Stalinsky D.V., Rudyuk A.S., Soleny V.K. The effectiveness of using small-diameter grinding balls for grinding cement. *Steel*. 2022;6:15-19 .(In Russ)
14. Khanin S.I., Starchenko D.N. Regularities of the process of movement of grinding media in the body of a ball drum mill. Monograph. Belgorod, 2013.(In Russ)
15. Sharapov R.R. Scientific basis for creating technological cement grinding systems based on closed-cycle ball mills. Abstract of the dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences. *Belgorod State Technological University named after. V.G. Shukhova*. Belgorod, 2009. (In Russ)
16. Sharapov R.R. Scientific basis for creating technological cement grinding systems based on closed-cycle ball mills. Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences. *Belgorod State Technological University named after. V.G. Shukhova*. Belgorod, 2009. (In Russ)
17. Sharapov R.R. Efficiency of closed cycle grinding systems based on ball mills. In the collection: Current problems of the construction industry and education. Collection of reports of the First National Conference. 2020; 277-282.(In Russ)
18. Shakhova L.D., Cherkasov R.A. Intensification of the clinker grinding process using grinding intensifiers. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after. V.G. Shukhova*. 2014;4:148-152.(In Russ)

Сведения об авторах:

Крутилин Александр Александрович, кандидат технических наук, доцент, кафедра «Строительные материалы и специальные технологии»; kotyra84@bk.ru; ORCID 0000-0002-2116-5192

Потапов Федор Петрович, кандидат технических наук, доцент, кафедра «Строительные материалы и специальные технологии»; efedrin.ru@yandex.ru, ORCID 0000-0003-0534-6396.

Надежда Александровна Инькова, старший преподаватель, кафедра «Строительные материалы и специальные технологии»; coyote@bk.ru0000-0002-3108-3465.

Пахомова Олеся Константиновна, старший преподаватель, кафедра «Строительные материалы и специальные технологии»; pahomovaolesia@yandex.ru ORCID 0000-0002-7156-9988.

Information about the authors:

Alexander A. Krutinin, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Department of Building Materials and Special Technologies; koty-ra84@bk.ru

Fedor P. Potapov, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Department of Building Materials and Special Technologies; efedrin.ru@yandex.ru, ORCID 0000-0003-0534-6396.

Nadezhda A. Inkova, Senior Lecturer, Department of Building Materials and Special Technologies; coyote@bk.ru

Olesya K. Pakhomova, Senior Lecturer, Department of Building Materials and Special Technologies; pahomovaole-sia@yandex.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/ Received 26.03.2024.

Одобрена после рецензирования / Reviced 04.05.2024.

Принята в печать/ Accepted for publication 04.05.2024.

**Свободные колебания непрерывно-дискретной многопролетной балки
с учетом инерционных сил вращения**

Х.П. Культербаев¹, М.М. Пайзулаев², Ш.А. Омаров²

¹Северо-Кавказский федеральный университет,

¹355017, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1, Россия,

²Дагестанский государственный технический университет,

²367026, г. Махачкала, пр. И. Шамиля, 70, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является оценка свободных колебаний непрерывно-дискретной многопролетной балки с учетом инерционных сил вращения. Поставлена цель определения спектра собственных частот, коэффициентов демпфирования и собственных форм. **Метод.** Исследование основано на методах линейной механики конструкций; численных и численно-аналитических методах расчета. Решение задачи отыскивается с помощью метода разделения переменных. Вращательные движения частиц непрерывных участков учитываются согласно одной из моделей балки Тимошенко. Использован принцип Даламбера и гипотезы о малости перемещений и углов поворота сечений. **Результат.** Получена система уравнений в матрично-векторной форме. Математическая модель поперечных колебаний состоит из трёх систем дифференциальных уравнений. В уравнение включаются поперечные силы, внешние сосредоточенные силы, даламберовы силы инерции, силы линейно-вязкого сопротивления. Учитываются силы инерции вращения сосредоточенных масс. Граничные и другие дополнительные условия к уравнениям соответствуют расчётной схеме. Левый конец балки шарнирно оперт. На стыке участков выполняются условия сопряжения. **Вывод.** Данный случайный процесс возмущений весьма близок к процессам, использующимся в детерминистических задачах. Амплитуды и среднеквадратические отклонения перемещений в детерминистической и стохастической задачах почти совпадают, что подтверждает достоверность предложенной теории расчёта. Анализ кривых показывает, что среднеквадратические отклонения существенным образом зависят от степени коррелированности компонентов векторного случайного процесса возмущений. Использование современных вычислительных компьютерных систем типа Matlab позволяет удачно сочетать достоинства как численных, так и графических способов.

Ключевые слова: поперечные и свободные колебания балки, непрерывно-дискретная многопролётная балка, поступательное движение, вращательное движение, принцип Даламбера, силы линейно-вязкого сопротивления

Для цитирования: Х.П. Культербаев, М.М. Пайзулаев, Ш.А. Омаров. Свободные колебания непрерывно-дискретной многопролётной балки с учетом инерционных сил вращения. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2024; 51(3): 202-214. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-3-202-214

**Free vibrations of a Continuous-discrete multi-span Beam taking into account
inertial Rotation Forces**

H.P. Kulterbaev¹, M.M. Paizulaev², Sh.A. Omarov²

¹North Caucasus Federal University,

¹1 Pushkina St., Stavropol 355017, Russia,

²Daghestan State Technical University,

²70 I.Shamil Ave., Makhachkala 367026, Russia

Abstract. Objective. The aim of the study is to estimate free vibrations of a continuous-discrete multi-span beam taking into account the inertial forces of rotation. The goal is to determine the spectra of natural frequencies, damping coefficients and natural modes. **Method.** The study is based on the methods of linear mechanics of structures; numerical and numerical-analytical calculation methods. The solution to the problem is found using the method of separation of variables. Rotational movements of particles of continuous sections are taken into account according to one of the models of the Timoshenko beam. The D'Alembert principle and hypotheses on the smallness of displacements and angles of rotation of sections are used. **Result.** A system of equations in matrix-vector form is obtained. The mathematical model of transverse vibrations consists of three systems of differential equations. The equation includes transverse forces, external concentrated forces, d'Alembert inertial forces, and linear-viscous resistance forces. The inertial forces of rotation of concentrated masses are taken into account. The boundary and other additional conditions to the equations correspond to the calculation scheme. The left end of the beam is hinged. The conjugation conditions are met at the junction of the sections. **Conclusions.** This random process of disturbances is very close to the processes used in deterministic problems. The amplitudes and standard deviations of displacements in the deterministic and stochastic problems almost coincide, which confirms the reliability of the proposed calculation theory. Analysis of the curves shows that the standard deviations significantly depend on the degree of correlation of the components of the vector random process of disturbances. The use of modern computing computer systems such as Matlab allows us to successfully combine the advantages of both numerical and graphical methods.

Keywords: transverse and free vibrations of a beam, continuous-discrete multi-span beam, translational motion, rotational motion, d'Alembert's principle, linear-viscous resistance forces

For citation: H.P. Kulterbaev, M.M. Paizulaev, Sh.A. Omarov. Free vibrations of a Continuous-discrete multi-span Beam taking into account inertial Rotation Forces. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2024;51(3):202-214. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-3-202-214

Введение. Рассматривается установившийся режим поперечных колебаний балки (рис. 1), состоящей из пролётов (участков), каждый с размером l_i ($i = 1, 2, \dots, n$), площадью поперечного сечения S_i , осевым моментом инерции поперечного сечения J_i , из материала с модулем упругости E и плотностью ρ , при коэффициенте вязкого трения η .

На балке расположены сосредоточенные массы M_i ($i = 1, 2, \dots, N$; $N = n+1$), обладающие осевыми моментами инерции I_i относительно оси, перпендикулярной плоскости чертежа. Балка поддерживается упругими опорами с коэффициентами жёсткости c_i и демпферами с соответствующими коэффициентами линейно-вязкого сопротивления v_i . Каждая пара из упругой опоры и демпфера расположена на общем основании (фундаменте, автономном по отношению к другим). В продольном направлении балка растягивается (сжимается) силой P .

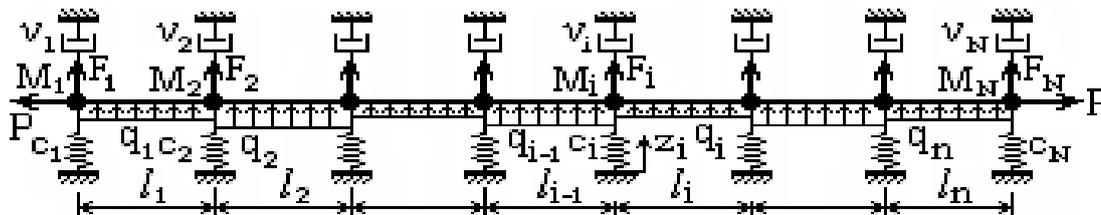


Рис. 1. Установившийся режим поперечных колебаний балки
 Fig. 1. Steady-state mode of transverse vibrations of a beam

Постановка задачи. Источниками колебаний балки являются динамические сосредоточенные силы $F_i(t)$, равномерно распределённые нагрузки $q_i(t)$ и кинематические смещения опор $z_i(t)$. Механическая модель такого сооружения представляет собой смешанную непрерывно - дискретную систему, состоящую из участков балки с распреде-

лённой массой и совокупности сосредоточенных масс [1- 8]. Обычная ситуация состоит в том, что горизонтальные перемещения как частиц массы континуальных участков, так и дискретных масс пренебрежимо малы по сравнению с вертикальными перемещениями и, поэтому они в математическую модель колебаний не будут включаться.

Целью исследования является оценка свободных колебаний континуально-дискретной многопролетной балки с учетом инерционных сил вращения.

Методы исследования. Вращательные движения частиц континуальных участков учтём согласно одной из моделей балки Тимошенко, но при этом будем пренебрегать деформациями сдвига, имея в виду, что будут рассматриваться сравнительно длинные балки (и их пролёты). Тогда данный эффект не играет заметной роли, но при этом будут учитываться инерционные силы от линейных и угловых перемещений.

Положение континуальных участков будем определять с помощью вектор-функции векторного и скалярного аргументов $\mathbf{u}(\mathbf{x}, t)$, соответствующей смещениям балки в поперечном направлении, t – время. При этом используется локальная система пространственных координат $x_i \in [0, l_i]$ с началом на левом конце каждого участка. Компоненты вектора \mathbf{u} соответствуют пролётам между опорами. Размеры сосредоточенных масс в горизонтальном направлении будем считать пренебрежимо малыми по сравнению с пролётами балки, т. е. в расчётах равными нулю. Центры сосредоточенных масс при этом лежат на продольной центральной оси балки. Тогда движения сосредоточенных масс являются плоскопараллельными с полюсом в центре масс, а сами движения состоят из поступательного движения в вертикальном направлении и из вращательного движения вокруг полюса [3, 5, 8].

Положения сосредоточенных масс определяются линейными координатами $\mathbf{y}(t)$, отсчитываемыми по вертикали от положения статического равновесия.

Математическая модель поперечных колебаний будет представлена в виде трёх систем дифференциальных уравнений.

Первая из них соответствует множеству континуальных участков. В предположении о малости отклонений в поперечном направлении колебаниям каждого пролёта балки соответствует линейное неоднородное дифференциальное уравнение в частных производных гиперболического типа. Тогда в векторной форме при учёте инерции вращающейся распределённой массы можно записать

$$\mathbf{B} \circ \mathbf{u}^{IV} - \mathbf{P} \mathbf{u}'' - \mathbf{R} \circ \ddot{\mathbf{u}}'' + \mathbf{m} \circ \ddot{\mathbf{u}} + \eta \mathbf{m} \circ \dot{\mathbf{u}} = \mathbf{q}, \quad \mathbf{x} \in (0, l), \quad t > -\infty. \quad (1)$$

Здесь и далее изображение \circ означает операцию поэлементного перемножения векторов, так что из $\mathbf{c} = \mathbf{a} \circ \mathbf{b}$ следует $c_k = a_k b_k$; точки над буквами соответствуют дифференцированию по времени, штрихи в индексах – дифференцированию по соответствующим локальным пространственным координатам, четыре штриха заменены римской цифрой; \mathbf{m} – вектор погонных масс пролётов балки, $m_i = \rho S_i$; \mathbf{B} – вектор жёсткостей балки на изгиб, $B_i = EJ_i$; \mathbf{R} – вектор осевых моментов инерции вращающейся массы элемента балки единичной длины, $R_i = \rho J_i$; $\mathbf{0}$ – нуль-вектор.

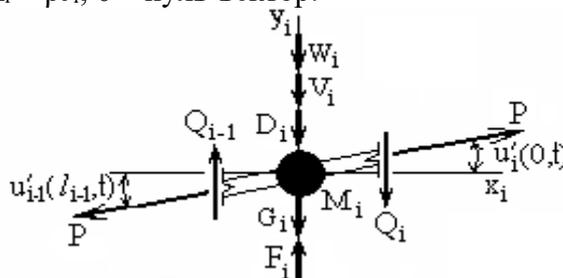


Рис. 2. Схема распределения сил
 Fig. 2. Force distribution diagram

В левой части уравнения (1) в порядке следования слагаемых учтены силы упругости, осевая продольная сила, силы инерции вращающейся массы, силы инерции от линейных перемещений, силы линейно-вязкого трения.

Вторая система представляет собой совокупность обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающих вертикальные движения множества дискретных масс. Они составляются с использованием принципа Даламбера и гипотезы о малости перемещений и углов поворота сечений. При этом в уравнение включаются поперечные силы Q_i , Q_{i-1} , внешние сосредоточенные силы F_i , даламберовы силы инерции D_i , силы линейно-вязкого сопротивления (опор, конструктивных сочленений, внешней среды, внутри материала и т.д.) V_i , линейно-вязкие силы сопротивления в демпферах W_i , упругие силы в гибких элементах опор G_i (рис. 2). В итоге векторная форма уравнений принимает вид

$$M \circ \ddot{y} + \mu M \circ \dot{y} + v \circ (\dot{y} - \dot{z}) + c \circ (y - z) + b(u) = F, \quad t > -\infty. \quad (2)$$

Здесь $y(t)$ – вектор-функция скалярного аргумента, описывающая отклонения сосредоточенных масс, μ – удельный коэффициент вязкого трения.

Суть каждого из уравнений в том, что сумма проекций на вертикальную ось всех сил, приложенных к массе M_i , равна нулю. Первое слагаемое в левой части соответствует инерционной (даламберовой) силе, второе и третье учитывают диссипативные силы, четвертое слагаемое – упругие силы в гибких опорах, пятое – поперечные силы в сечениях балки слева и справа от сосредоточенных масс.

Все векторы считаются вектор – столбцами (исключения оговариваются), поэтому знаки транспонирования опущены. Введены обозначения для векторов, размерности которых очевидны

$$\begin{aligned} l &= \{l_1, l_2, \dots, l_n\}, \quad \mathbf{x} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}, \quad \mathbf{S} = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}, \\ \mathbf{J} &= \{J_1, J_2, \dots, J_n\}, \quad \mathbf{c} = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}, \\ \mathbf{u}(\mathbf{x}, t) &= \{u_1(x_1, t), u_2(x_2, t), \dots, u_n(x_n, t)\}, \\ \mathbf{y}(t) &= \{y_1(t), y_2(t), \dots, y_n(t)\}, \quad \mathbf{v} = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}, \\ \mathbf{q}(t) &= \{q_1(t), q_2(t), \dots, q_n(t)\}, \quad \mathbf{m} = \{m_1, m_2, \dots, m_n\}, \quad \mathbf{z}(t) = \{z_1(t), z_2(t), \dots, z_n(t)\}, \\ \mathbf{M} &= \{M_1, M_2, \dots, M_n\}, \quad \mathbf{b}(\mathbf{u}) = \{b_1(\mathbf{u}), b_2(\mathbf{u}), \dots, \\ & b_n(\mathbf{u})\}, \quad \mathbf{F}(t) = \{F_1(t), F_2(t), \dots, F_n(t)\}. \end{aligned}$$

$\mathbf{b}(\mathbf{u})$ – вектор упругих внутренних сил, компоненты которого образованы проекциями на вертикальную ось поперечных сил в сечениях балки слева и справа от сосредоточенных масс

$$b_1(\mathbf{u}) = B_1 u_1''(0, t), \quad b_i(\mathbf{u}) = B_i u_1''(0, t) - B_{i-1} u_{i-1}''(l_{i-1}, t), \quad i = 2, 3, \dots, n, \quad b_n(\mathbf{u}) = -B_n u_n''(l_n, t).$$

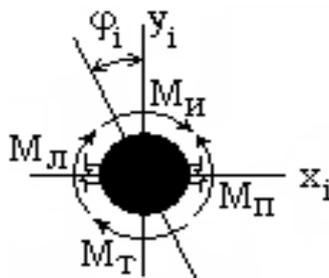


Рис. 3. Силы инерции сосредоточенных масс
 Fig. 3. Inertial forces of concentrated masses

Третья система уравнений состоит также из обыкновенных дифференциальных уравнений, но уже составляется относительно угловых координат. Их появление в математической модели колебаний вызвано необходимостью учёта сил инерции вращения сосредоточенных масс (рис. 3). На рис. 3 изображены моментные силовые факторы, участвующие во вращательном движении сосредоточенной массы M_i .

В частности, $M_л$, $M_п$ – изгибающие моменты в сечении балки левее и правее сосредоточенной массы, $M_и$ – инерционный момент от вращения массы, $M_т$ – демпфирующий момент. По принципу Даламбера их сумма равна нулю, т. е. будет

$$M_л - M_п + M_и + M_т = 0. \quad (3)$$

Выразим слагаемые через известные соотношения

$$M_{Л} = E J_{i-1} u''_{i-1}(l_{i-1}, t), \quad M_{П} = E J_i u''_i(0, t), \quad M_{И} = I_i \ddot{\varphi}_i(t), \quad M_{Т} = I_i \sigma \dot{\varphi}_i(t). \quad (4)$$

Здесь I_i – моменты инерции сосредоточенных масс относительно оси, перпендикулярной плоскости чертежа, σ – коэффициент вязкого трения при вращении масс, $\varphi_i(t)$ – компоненты вектора углов поворота сосредоточенных масс.

Подставим (4) в (3) и запишем уравнение

$$I \circ \ddot{\varphi} + \sigma I \circ \dot{\varphi} + d(u) = 0, \quad (5)$$

где введены обозначения

$$I = \{I_1, I_2, \dots, I_N\}, \quad d(u) = \{d_1, d_2, \dots, d_N\}, \quad d_1(u) = -B_1 u''_1(0, t), \\ d_i(u) = B_{i-1} u''_{i-1}(l_{i-1}, t) - B_i u''_i(0, t), \quad i = 2, 3, \dots, n, \quad d_N(u) = B_n u''_n(l_n, t); \\ \varphi = \{\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_N\}^T.$$

Уравнения (2), (5) могут быть получены другим способом. Учтём, что сосредоточенные массы M (рис. 2) являются твёрдыми телами, совершающими плоскопараллельные движения. Если пренебречь перемещениями в горизонтальном направлении вследствие их малости в обычной ситуации, то движения будут описываться двумя векторными уравнениями

$$M \circ a_C = \sum F_k^e, \quad I_{Cz} \circ \varepsilon = \sum m_{Cz}(F_k^e). \quad (6)$$

Здесь a_C – ускорение центра масс C в вертикальном направлении, $\sum F_k^e$ – сумма внешних сил, приложенных к массе (рис. 2), I_{Cz} – осевой момент инерции твёрдого тела относительно оси Cz , движущейся поступательно вместе с центром масс, ε – угловое ускорение твёрдого тела, $\sum m_{Cz}(F_k^e)$ – сумма моментов внешних сил относительно оси. Нетрудно показать, что замена a_C и ε соответствующими производными \ddot{y} и $\ddot{\varphi}$, использование сил и моментов, показанных на рис. 2 и 3, в уравнениях (6) приведёт к (2), (5).

Функции $y(t)$ и $\varphi(t)$ можно исключить из уравнений (2), (5), пользуясь соотношениями, вытекающими из гипотезы о малости как линейных, так и угловых перемещений, т.е. будет

$$y_i(t) = u_i(0, t), \quad i = 1, 2, \dots, n; \quad y_N(t) = u_n(l_n, t), \\ \varphi_i(t) = u'_i(0, t), \quad i = 1, 2, \dots, n; \quad \varphi_N(t) = u'_n(l_n, t). \quad (7)$$

Поставим дальнейшей целью определение спектров собственных частот, коэффициентов демпфирования и собственных форм. В таком случае начальные условия к системе уравнений (1), (2), (5) не требуются, $z(t) \equiv 0$, $F(t) \equiv 0$, $q(t) \equiv 0$. Граничные и другие дополнительные условия к уравнениям (1) должны соответствовать расчётной схеме. Левый конец балки шарнирно оперт. Вертикальные колебания массы M_1 , сосредоточенной здесь, описываются первым уравнением системы (2) с заменой $y_1(t)$ на $u_1(0, t)$

$$M_1 \ddot{u}_1(0, t) + g_1 \dot{u}_1(0, t) + c_1 u_1(0, t) + B_1 u'''_1(0, t) = 0, \quad g_1 = \mu M_1 + \nu_1. \quad (8)$$

Угловые колебания описываются первым уравнением системы (5) с заменой $\varphi_1(t)$ на $u'_1(0, t)$ в соответствии с (7)

$$I_1 \ddot{u}'_1(0, t) + \sigma I_1 \dot{u}'_1(0, t) - B_1 u''_1(0, t) = 0. \quad (9)$$

На стыке $(i - 1)$ – го и i – го участков должны выполняться условия сопряжения:

- перемещения и углы поворота слева и справа от сосредоточенной массы равны между собой

$$u_{i-1}(l_{i-1}, t) = u_i(0, t), \quad u'_{i-1}(l_{i-1}, t) = u'_i(0, t); \quad i = 2, 3, \dots, n; \quad (10)$$

- линейные и угловые колебания сосредоточенных масс M_i описываются уравнениями системы (2) и (5) с заменой $y_i(t)$ на $u_i(0, t)$ и $\varphi_i(t)$ на $u'_i(0, t)$

$$M_i \ddot{u}_i(0, t) + g_i \dot{u}_i(0, t) + c_i u_i(0, t) + B_i u_i'''(0, t) - B_{i-1} u_{i-1}'''(l_{i-1}, t) = 0, \quad g_i = \mu M_i + v_i, \quad i = 2, 3, \dots, n; \quad (11)$$

$$I_i \ddot{u}'_i(0, t) + \sigma I_i \dot{u}'_i(0, t) + B_{i-1} u_{i-1}''(l_{i-1}, t) - B_i u_i''(0, t) = 0, \quad i = 2, 3, \dots, n. \quad (12)$$

На правом конце балки должны выполняться граничные условия, аналогичные (1), (2)

$$M_N \ddot{u}_n(l_n, t) + g_N \dot{u}_n(l_n, t) + c_N u_n(l_n, t) - B_n u_n'''(l_n, t) = 0, \quad g_N = \mu M_N + v_N, \quad (13)$$

$$I_N \ddot{u}'_n(l_n, t) + \sigma I_N \dot{u}'_n(l_n, t) + B_n u_n''(l_n, t) = 0. \quad (14)$$

Решение задачи (8), (8) - (14) отыскивается с помощью метода разделения переменных как произведение

$$u_i(x_i, t) = X_i(x_i) e^{\lambda t}, \quad (15)$$

где характеристический показатель представлен в виде суммы

$$\lambda = -\varepsilon + j\omega, \quad (16)$$

ε и ω – подлежащие определению коэффициент затухания и частота свободных колебаний.

Подстановка (15) в (8) даёт уравнение

$$X_i^{IV} - 2v_i X_i'' + \theta_i^2 X_i = 0, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (17)$$

при обозначениях $v_i = \frac{P + \lambda^2 R_i}{2B_i}$, $\theta_i^2 = \frac{m_i(\lambda^2 + \eta\lambda)}{B_i}$.

Аналогичная подстановка (15) в дополнительные условия (8) – (14) приведёт к следующим уравнениям:

$$e_1 X_1(0) + B_1 X_1'''(0) = 0, \quad e_1 = M_1 \lambda^2 + g_1 \lambda + c_1; \quad (18)$$

$$\gamma_1 X_1'(0) - B_1 X_1''(0) = 0, \quad \gamma_1 = I_1 \lambda (\lambda + \sigma), \quad (19)$$

$$X_{i-1}(l_{i-1}) = X_i(0), \quad X'_{i-1}(l_{i-1}) = X'_i(0), \quad i = 2, 3, \dots, n; \quad (20)$$

$$e_i X_i(0) + B_i X_i'''(0) - B_{i-1} X_{i-1}'''(l_{i-1}) = 0, \quad e_i = M_i \lambda^2 + g_i \lambda + c_i, \quad i = 2, 3, \dots, n; \quad (21)$$

$$\gamma_i X_i'(0) + B_{i-1} X_{i-1}''(l_{i-1}) - B_i X_i''(0) = 0, \quad \gamma_i = I_i \lambda (\lambda + \sigma), \quad i = 2, 3, \dots, n; \quad (22)$$

$$e_N X_N(l_n) - B_N X_N'''(l_n) = 0, \quad e_N = M_N \lambda^2 + g_N \lambda + c_N; \quad (23)$$

$$\gamma_N X_N'(l_n) + B_N X_N''(l_n) = 0, \quad \gamma_N = I_N \lambda (\lambda + \sigma). \quad (24)$$

Фундаментальную систему частных решений уравнения (17) можно записать как вектор-функцию

$$\xi_i(x) = \{\sin \alpha_i x_i, \quad \cos \alpha_i x_i, \quad \operatorname{sh} \beta_i x_i, \quad \operatorname{ch} \beta_i x_i\}^T, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (25)$$

где

$$\alpha_i = \sqrt{-v_i + \sqrt{v_i^2 - \theta_i^2}}, \quad \beta_i = \sqrt{v_i + \sqrt{v_i^2 - \theta_i^2}}.$$

Тогда общее решение уравнения в векторной форме примет вид

$$X_i(x_i) = \mathbf{D}_i \xi_i(x_i). \quad (26)$$

Здесь $\mathbf{D}_i = \{C_{4i-3}, C_{4i-2}, C_{4i-1}, C_{4i}\}$, $i = 1, 2, \dots, n$ - вектор-строка постоянных интегрирования. Запишем (26) в развёрнутой форме

$$X_i(x_i) = \mathbf{D}_i \{\sin \alpha_i x_i, \quad \cos \alpha_i x_i, \quad \operatorname{sh} \beta_i x_i, \quad \operatorname{ch} \beta_i x_i\}^T. \quad (27)$$

Дифференцируя (27) трижды, имеем

того, получить его аналитические решения удаётся лишь в простейших случаях. Выход из таких затруднений состоит в применении численных методов и ЭВМ [9, 10]. При этом будем ориентироваться на алгоритмические языки и программные системы, позволяющие непосредственно пользоваться функциями комплексной переменной и проводить алгебраические и другие действия над ними (например, Mathcad, Matlab) [11].

Уравнение (32) с учётом того, что его левая часть представляет комплексную функцию, можно переписать в виде

$$f_1(\varepsilon, \omega) + j f_2(\varepsilon, \omega) = 0.$$

Отсюда следует, что коэффициент затухания ε и частота свободных колебаний ω должны определяться из системы двух нелинейных трансцендентных уравнений

$$f_1(\varepsilon, \omega) = 0, \quad f_2(\varepsilon, \omega) = 0. \quad (33)$$

Лишь в редких частных случаях, совпадающих с классическими, решения задачи выписываются в явном виде. В более сложных случаях можно обойтись без явного развёртывания определителя матрицы \mathbf{A} и получения формул для корней трансцендентной системы (33). Эти вопросы рассмотрим подробнее.

Корни системы (33) могут быть найдены лишь графическими или численными методами. Но и в этом случае решение задачи из-за её нелинейности связано с известными сложностями по множеству причин:

1) обычно применяемые итерационные методы решения ограничены условиями сходимости, выполнение которых в данной задаче трудно проверять и обеспечивать;

2) корни системы являются многозначными, т. е. существует счётное бесконечное множество пар $(\varepsilon_k, \omega_k)$, удовлетворяющих системе уравнений, и это влечёт опасность потери некоторых из корней в процессе вычислений;

3) трудно выполнить необходимый этап предварительного отделения корней, т. е. заключения корней для начала счёта в достаточно малые области, внутри которых не было бы других корней.

Как оказалось при выполнении конкретных примеров, эти сложности могут быть преодолены с помощью пробных вычислительных экспериментов на ЭВМ и применения эффективных численных схем. Использование современных вычислительных компьютерных систем типа Matlab при этом позволяет весьма удачно сочетать достоинства как численных, так и графических способов. Решение системы уравнений найдём с помощью метода покоординатного спуска. С этой целью образуем вспомогательную неотрицательную функцию

$$\Phi(\varepsilon, \omega) = |\det \mathbf{A}(\varepsilon, \omega)| = [f_1^2(\varepsilon, \omega) + f_2^2(\varepsilon, \omega)]^{1/2},$$

обращающуюся в ноль лишь в тех точках, где $f_1(\varepsilon, \omega) = f_2(\varepsilon, \omega) = 0$.

Таким образом, решение исходной системы (24) будет одновременно точкой нулевого минимума скалярной функции векторного аргумента $\Phi(\xi)$, так что теперь необходимо решать более простую (по крайней мере в данном случае) задачу

$$\Phi(\xi) = 0, \quad \xi = \{\varepsilon, \omega\}^T \in \mathbb{R}^2 \cap (\varepsilon > 0, \omega > 0).$$

Здесь вектор ξ соответствует искомым величинам, $\Phi(\xi)$ представляет мультимодальную функцию, имеющую множество локальных минимумов.

Суть применяемого метода состоит в построении последовательности точек (приближений к решению) $\xi_k, k = 0, 1, \dots$, сходящейся к точке локального минимума ξ^* . При этом в процессе вычислений необходимо добиваться, чтобы значения вспомогательной функции были монотонно убывающими и ограниченными снизу

$$\Phi(\xi_0) \geq \Phi(\xi_1) \geq \dots \geq \Phi(\xi_k) \geq \dots \geq \Phi(\xi^*). \quad (34)$$

Для реализации такой цели вначале с помощью численных экспериментов намечается начальная точка последовательности ξ_0 . Затем определяются последующие приближения ξ_k с помощью соотношений $\xi_{k+1} = \xi_k + \mathbf{h}_k$,

где \mathbf{h}_k – вектор приращений координат, обеспечивающий выполнение условий (34).

Условием прекращения вычислительной процедуры α , значит, и признаком достижения корня с необходимой точностью служит выполнение неравенства

$$\Phi(\xi_{k+1}) < \delta, \quad (35)$$

δ – априорно задаваемое малое положительное число (точность вычислений).

Многочисленное повторение такой процедуры вычислений даёт спектры коэффициентов затухания и собственных частот $\{(\varepsilon_1, \omega_1), (\varepsilon_2, \omega_2), \dots\}$.

При реализации предлагаемой численной схемы наибольшая сложность состоит в правильном выборе приращений координат $\mathbf{h} = \{\Delta\varepsilon, \Delta\omega\}$ на каждом шаге по величине и по знаку. В этом месте обычные подходы к составлению компьютерных программ вычислений требуют высокого программистского искусства, а сами программы получаются сложными и громоздкими. Трудности существенно упрощаются, если используемая система программирования позволяет оперативно визуализировать результаты вычислений.

Поясним сказанное на примере данной задачи при пользовании программной системой Matlab [10]. Один из аргументов функции $\Phi(\varepsilon, \omega)$, например, ε фиксируется, вычисляются ординаты функции $\Phi(\omega | \varepsilon)$, на экран компьютера выводится её график, вычисления приостанавливаются. По кривой, являющейся сечением поверхности $\Phi(\varepsilon, \omega)$, отчётливо видны условные минимумы функции $\Phi(\omega | \varepsilon)$. Теперь приращаем аргумент ω , фиксируем его на значении, соответствующем локальному минимуму, и строим новый график $\Phi(\varepsilon | \omega)$. Такая процедура продолжается до выполнения условия (35).

Далее задача состоит в определении собственных форм каждого участка балки, имеющих вид (27). Следовательно, необходимо ставить вопрос об отыскании собственного вектора \mathbf{C} . Поскольку определитель матрицы \mathbf{A} равен нулю, найти однозначно компоненты вектора \mathbf{C} как решение системы уравнений (31) невозможно. В силу этого, необходимо задаваться одним из компонентов вектора, а затем находить остальные значения из уравнений (31). Это значит, что собственный вектор будет определяться с точностью до постоянного множителя.

Составим алгоритм счёта, последовательно определяющий элементы вектора \mathbf{C} . Он состоит в следующем. Положим, что $C_1 = 1$, исключим его из системы уравнений (31). Этим самым порядок системы уравнений становится равным $4n-1$, что соответствует количеству оставшихся неизвестных. Запишем получившуюся неоднородную систему уравнений в виде

$$\mathbf{\Gamma} \mathbf{\Lambda} = \mathbf{\Lambda}, \quad (36)$$

где $\mathbf{\Gamma}$ – квадратная матрица, получающаяся из \mathbf{A} путём вычёркивания первого столбца и последней строки, $\mathbf{\Lambda} = (C_2, C_3, C_4, \dots, C_{4n})^T$ – вектор, остающийся от \mathbf{C} после исключения C_1 , $\mathbf{\Lambda}$ – вектор-столбец, получаемый в ходе указанных преобразований. Решение системы (36) даётся формулой

$$\mathbf{\Lambda} = \mathbf{\Gamma}^{-1} \mathbf{\Lambda}, \quad (37)$$

Последнее уравнение (31) при этом целесообразно использовать для контроля правильности вычислений. Проводя указанные вычисления, следует помнить, что $X_i(x_i)$, найденные по (27), являются комплексными функциями. Действительные же собственные формы имеют вид

$$\varphi_k(x_i) = \text{real} [X_i^{(k)}(x_i)], \quad k = 1, 2, \dots, \quad i = 1, 2, \dots, n,$$

k – номер собственной формы, i – номер пролёта.

Обсуждение результатов. Обратимся к задачам, для которых проведены компьютерные вычисления. Рассмотрены свободные колебания стальной балки из двутавра № 14 с тремя пролётами при следующих входных данных

$$I_2 = I_3 = 0, \quad I_1 = I_4 = I, \quad S_i = 17,4 \text{ см}^2,$$

$$J_i = 572 \text{ см}^4, \quad i = 1, 2, 3; \quad \rho = 7800 \text{ кг/м}^3,$$

$$E = 200 \text{ ГПа}, \quad P=0, \quad \eta = 0,05 \text{ с}^{-1}, \quad \mu=0,02 \text{ с}^{-2}, \quad \sigma = 0,01 \text{ с}^{-2}, \quad M_1 = M_4 = 0,$$

$$l_1 = l_2 = l_3 = 3 \text{ м}, \quad c_1 = c_4 = \infty, \quad c_2 = c_3 = c, \quad v_1 = v_4 = 0, \quad v_2 = v_3 = v.$$

В табл.1 представлены первые три частоты и коэффициента затухания свободных колебаний при вариации параметров M_i, v_i, c_i .

Для сравнения в первой строке приведены результаты, полученные точной формулой при $l_1=3$ м для классической схемы однопролётной свободно опертой балки: сосредоточенные массы отсутствуют, коэффициенты трения и жёсткости равны нулю. Те же характеристики вычислены по предложенной выше методике и представлены в строке 2. Как можно заметить, результаты, полученные численными и точными методами, оказались совпадающими с высокой степенью точности.

Таблица 1. Первые три частоты и коэффициента затухания свободных колебаний при вариации параметров M_i, v_i, c_i .

Table 1. The first three frequencies and damping coefficients of free oscillations with variations in parameters M_i, v_i, c_i .

№	M_2	M_3	I	c	v	ε_1	ω_1	ε_2	ω_2	ε_3	ω_3
	кг		кг·м ²	кН/м	кг/с	с ⁻¹					
1	0	0	0	0	0	0,0250	35,35	0,0249	141,21	0,0249	317,40
2	0	0	0	0	0	0,0250	35,34	0,0250	141,21	0,0249	317,40
3	100	0	0	0	0	0,0228	23,43	0,0230	113,84	0,0249	317,40
4	100	100	0	0	0	0,0210	19,01	0,0190	74,74	0,0249	317,40
5	100	100	0	0	50	0,0362	19,00	0,0585	74,74	0,0249	317,40
6	100	100	0	10000	50	0,0393	20,79	0,0594	75,22	0,0249	317,40
7	100	100	100	10000	50	0,0923	19,67	0,0605	61,70	0,0339	144,78

Интересно заметить, что третьи частоты и коэффициенты затухания остаются постоянными при всех вариациях параметров в строках 1-5. Этот факт имеет следующее прозрачное объяснение. Обсуждаемые случаи соответствуют равенству размеров $l_1 = l_2 = l_3$, когда третья собственная форма колебаний имеет нулевые точки, совпадающие с границами участков, т. е. с координатами сосредоточенных масс. Поскольку сосредоточенные массы при этом неподвижны, частота таких колебаний зависит только от параметров балки, а не от сосредоточенных масс, и потому не меняется. По той же причине наличие опор и демпферов в неподвижных точках балки не сказывается на величине ε_3 , и она остаётся постоянной в этих строчках.

В балке строки 7 из-за введения моментов инерции I_1 и I_4 такая ситуация изменяется, учёт инерции вращения существенно уменьшает вторую и третью собственные частоты. В третьей строке даны результаты счёта уже при наличии дискретной массы $M_2 = 100$ кг. Как и следовало ожидать, коэффициенты затухания и собственные частоты уменьшились. Данные четвёртой строки подтверждают ожидаемый факт уменьшения первых двух собственных частот при появлении второй сосредоточенной массы M_3 . Добавление демпфера (строка 5) весьма существенно увеличивает коэффициенты затухания.

Рост коэффициентов жёсткостей пружин в шестой строке привёл к повышению общей жёсткости системы, вследствие чего увеличились собственные частоты. Введение же демпферов с коэффициентом v (строка 7) приводит к обратным эффектам. Как и следовало ожидать, при увеличении коэффициента демпфирования коэффициент затухания растёт существенно.

На рис. 4 построены первые три собственные формы колебаний для случая, приведённого в седьмой строке. Очевидно, что увеличение собственной частоты сопровождается повышением искривлённости, волнистости собственных форм.

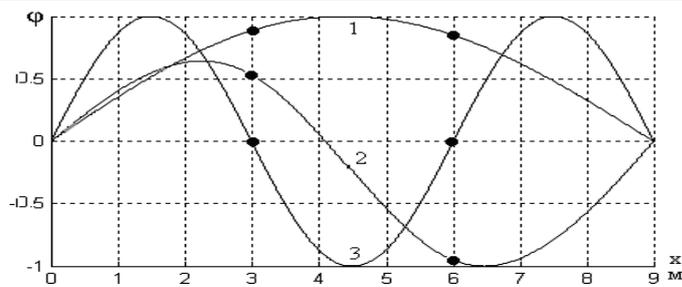


Рис. 4. Первые три собственные формы колебаний
 Fig. 4. The first three natural modes of oscillation

Влияние жёсткости балки и инерции вращения масс изучалось путём вариации параметров J_i , I_i . В табл. 2 представлены первые три частоты и коэффициента затухания свободных колебаний балки, скомбинированной из двутавров №14 и №16. При этом сосредоточенные массы имели значения $M = \{0, 200, 100, 0\}$ кг.

Таблица 2. Первые три частоты и коэффициента затухания свободных колебаний балки, скомбинированной из двутавров №14 и №16
 Table 2. The first three frequencies and damping coefficients of free vibrations of a beam combined from I-beams No. 14 and No. 16

№	J_1	J_2	J_3	I_1	I_2	I_3	I_4	ε_1	ω_1	ε_2	ω_2	ε_3	ω_3
	см ⁴			кг м ²				с ⁻¹					
1	572	572	572	0	0	0	0	0,1081	14,96	0,1095	56,93	0,0249	317,40
2	572	873	572	0	0	0	0	0,1068	16,57	0,1084	60,09	0,0249	333,98
3	873	873	873	0	0	0	0	0,1059	18,06	0,1074	69,42	0,0249	363,72
4	572	873	572	20	0	0	0	0,1061	16,51	0,1058	59,40	0,0157	232,44
5	572	873	572	0	20	0	0	0,1067	16,56	0,1075	59,86	0,0182	277,30
6	572	873	572	25	30	30	25	0,0502	18,28	0,0415	66,29	0,0111	183,70

В первых трёх строках табл. 2 рассмотрено влияние изменения общей жёсткости балки без учёта инерции вращения сосредоточенных масс. Видно, что увеличение жёсткости приводит к уменьшению коэффициентов затухания и увеличению собственных частот. В следующих строках исследуется влияние инерции вращения сосредоточенных масс. В строках 4, 5 интересно заметить, что учёт инерции вращения первой массы влияет на собственные значения в большей степени, чем второй массы. Это объясняется тем, что амплитуда угла поворота первой массы больше амплитуды второй массы.

Результаты, представленные в шестой строке, показывают, что учёт инерции вращения сосредоточенных масс приводит к уменьшению собственных значений. Причём, это влияние растёт с увеличением номера собственной частоты. Причина состоит в том, что учёт вращения масс равносителен уменьшению жёсткости колеблющейся системы.

Для той же стальной балки (строка 6, табл. 2), но теперь с разными пролётами, массами, пружинами и демпферами, определены собственные частоты и коэффициенты демпфирования при вариациях продольной силы (табл. 3).

Исходные параметры приняты следующими:

$$\begin{aligned}
 l &= \{3,5; 2,5; 3\} \text{ м}, & M &= \{100, 200, 200, 100\} \text{ кг}, \\
 c &= \{50, 30, 30, 50\} \text{ кН/м}, \\
 \rho &= 7820 \text{ кг/м}^3, & \eta &= 0,05 \text{ с}^{-1}, & v &= \{40, 50, 50, 40\} \text{ Нс/м}, \\
 I &= \{25, 30, 30, 25\} \text{ кг м}^2, \\
 S &= \{17,4; 20,2; 17,4\} \text{ см}^2, & J &= \{572, 873, 572\} \text{ см}^4, \\
 \mu &= 0,02 \text{ с}^{-1}, & \sigma &= 0,01 \text{ с}^{-2}.
 \end{aligned}$$

Таблица 3. Результаты расчетов
Table 3. Calculation results

№	P, кН	ε_1, c^{-1}	ω_1, c^{-1}	ε_2, c^{-1}	ω_2, c^{-1}	ε_3, c^{-1}	ω_3, c^{-1}	ε_4, c^{-1}	ω_4, c^{-1}	ε_5, c^{-1}	ω_5, c^{-1}
1	0	0,1267	14,01	0,1684	19,33	0,1702	32,86	0,1163	68,76	0,0139	179,62
2	104	0,1347	15,35	0,1718	19,64	0,1619	33,63	0,1130	72,52	0,0137	185,20
3	-104	0,1188	12,32	0,1640	18,91	0,1784	32,22	0,1208	64,72	0,0142	173,74
4	-200	0,1121	10,35	0,1580	18,36	0,1851	31,78	0,1261	60,78	0,0146	168,01
5	-400	0,1003	2,82	0,1378	16,17	0,1978	31,35	0,1473	51,89	0,0155	154,95

Анализируя результаты расчётов в табл. 3, можно заметить, что сжимающие силы на участках балки уменьшают собственные частоты, а растягивающие наоборот увеличивают. Продольные силы могут увеличивать или уменьшать коэффициенты демпфирования, в зависимости от формы колебаний. На рис. 5 показаны первые пять собственных форм колебаний, соответствующих строке 4.

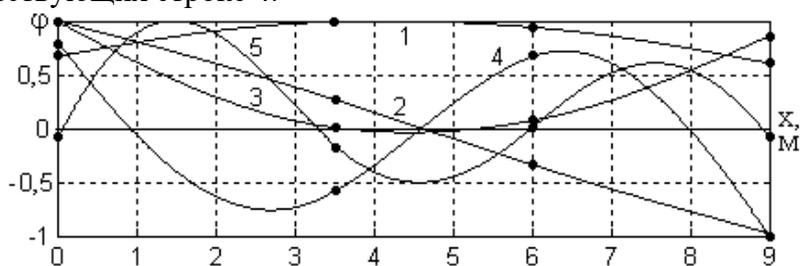


Рис. 5. Пять собственных форм колебаний
Fig. 5. Five natural vibration modes

При первой форме колебаний балка и сосредоточенные массы отклоняются в одну сторону синфазно, кривизна балки незначительная. Как видно по рисунку, балка совершает колебания по второй форме почти как абсолютно твёрдое тело почти при отсутствии изгибных деформаций. При этом третья и четвёртая сосредоточенные массы колеблются уже в противофазе с остальными. При колебаниях по третьей и более высоких формах кривизна балки становится большой, появляется многоволновость.

Вывод. Данный случайный процесс возмущений весьма близок к процессам, используемым в детерминистических задачах. Как следствие, амплитуды и среднеквадратические отклонения перемещений в детерминистической и стохастической задачах почти совпадают, что подтверждает достоверность предложенной теории расчёта.

Анализ кривых показывает, что среднеквадратические отклонения существенным образом зависят от степени коррелированности компонентов векторного случайного процесса возмущений. Использование современных вычислительных компьютерных систем типа Matlab позволяет весьма удачно сочетать достоинства как численных, так и графических способов.

Библиографический список:

1. Акимов П.А., Белостоцкий Т.Б. и др. Информатика в строительстве (с основами математического и компьютерного моделирования): учебное пособие. Москва: КНОРУС, 2017. -420 с.
2. Арутюнов С.К., Овчинников И.Н., Старцев В.А. Моделирование колебаний балки при случайном виброн нагружении. Прикладные проблемы механики ракетно-космических систем: Тез. докл. Всерос. конф., посвящ. 40-летию со дня основания каф. "Аэрокосм. системы" (СМ-2) МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, 5 дек. 2000. - М.: Изд-во МГТУ. -2000. С. 66.
3. Джанкулаев Аз. Я., Казиев А.М. Свободные колебания континуально-дискретной механической системы. «Перспектива – 2003»: Материалы Всероссийской научная конф. студентов, аспирантов и молодых учёных. – Т. VI. - Нальчик: Каб.-Балк. гос. университет., 2003. – С. 13-17.
4. Золотов А.Б., Акимов П.А., Сидоров В.Н. Математические методы в строительной механике (с основами теории обобщённых функций). –М.:Издательство АСВ, 2008. – 336 с.
5. Культербаев Х.П. Свободные колебания стержней с сосредоточенными массами // Известия высших учеб. завед. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. №.4, 2002. С.14-18.
6. Культербаев Х.П., Джанкулаев Аз.Я. Смешанная система дифференциальных уравнений как

- математическая модель колебаний континуально-дискретных механических систем // РАН, Владикавказский научный центр. Владикавказский математический журнал. Октябрь – декабрь, 2001, Том 3, Выпуск 4. С. 4-29 - 4-35.
7. Культербаев Х.П. Кинематически возбуждаемые колебания континуально-дискретной многопролётной балки // Вестник Нижегородского университета им. Н.И.Лобачевского. №4, часть 2. Труды X Всероссийского съезда по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. Изд-во ННГУ им. Н.И.Лобачевского, 2011. С. 198-200.
 8. Культербаев Х.П., М.М. Пайзулаев Устойчивость сжато-растянутого стержня переменного сечения при комбинированном нагружении // Вестник Дагестанского государственного технического университета Технические науки, 2023., 50(4)., С. 191-196.
 9. Вержбицкий В.М. Основы численных методов. М.: Высшая школа, 2002. 840 с.
 10. Вержбицкий В.М. Численные методы (линейная алгебра и нелинейные уравнения): -М.: ООО Издательский дом «Оникс 21 век», 2005. – 432 с.
 11. Культербаев Х.П. Введение в MATLAB. – Нальчик: Каб.-Балк. ун-т, 2006. – 57 с.

References:

1. Akimov P.A., Belostotsky T.B. and others. Computer science in construction (with the basics of mathematical and computer modeling): a study guide. Moscow: KNORUS, 2017;420 (In Russ)
2. Arutyunov S.K., Ovchinnikov I.N., Startsev V.A. Modeling of beam vibrations under random vibration loading. Applied problems of mechanics of rocket and space systems: Thesis. dokl. All-Russian conf., dedicated. to the 40th anniversary of the founding of the Aerospace Department. systems" (SM-2) Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 5 Dec. 2000. Moscow: Publishing House of the Moscow State Technical University. 2000;66. (In Russ)
3. Dzhanakulayev Az. Ya., Kaziev A.M. Free oscillations of a continually discrete mechanical system. "Perspektiva – 2003": Materials of the All-Russian Scientific Conference of Students, postgraduates and Young Scientists. – Vol. VI. - Nalchik: Office of the Baltic State. University., 2003; 13-17. (In Russ)
4. Zolotov A.B., Akimov P.A., Sidorov V.N. Mathematical methods in structural mechanics (with the basics of the theory of generalized functions). M.: Publishing House DIA, 2008;336(In Russ)
5. Kulterbaev H.P. Free vibrations of rods with concentrated masses. *Izvestiya vyshnykh ucheb. the institution. The North Caucasus region. Natural Sciences.* 2002; 4:14-18. (In Russ)
6. Kulterbaev H.P., Dzhanakulayev Az.Ya. Mixed system of differential equations as a mathematical model of oscillations of continually discrete mechanical systems. *RAS, Vladikavkaz Scientific Center. The Transcaucasian Mathematical Journal.* October – December, 2001; 3(4): 4-29 - 4-35. (In Russ)
7. Kulterbaev H.P. Kinematically excited oscillations of a continually discrete multi-span beam. *Bulletin of the Nizhny Novgorod University named after N.I.Lobachevsky.* No. 4, part 2. Proceedings of the X All-Russian Congress on Fundamental Problems of Theoretical and Applied Mechanics. Publishing house of N.I.Lobachevsky National Research University, 2011;198-200. (In Russ)
8. Kulterbaev H.P., M.M. Paizulaev Stability of a compressed-stretched rod of variable cross-section under combined loading. *Herald of the Daghestan State Technical University of Technical Sciences,* 2023;50(4): 191-196. (In Russ)
9. Verzhbitsky V.M. Fundamentals of numerical methods. Moscow: Higher School, 2002;840. (In Russ)
10. Verzhbitsky V.M. Numerical methods (linear algebra and nonlinear equations): Moscow: Onyx 21st Century Publishing House LLC, 2005;432. (In Russ)
11. Kulterbaev H.P. Introduction to MATLAB. Nalchik: Kab.-Bulk. Univ., 2006;57. (In Russ)

Сведения об авторах:

Культербаев Хусен Пшимурзович, доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник, kulthp@mail.ru

Пайзулаев Магомед Муртазалиевич, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой сопротивления материалов, теоретической и строительной механики, smdstu@mail.ru

Омаров Шамиль Абдулаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры сопротивления материалов, теоретической и строительной механики, keger1963@mail.ru.

Information about the authors:

Husen P. Kulterbaev, Dr. Sci. (Eng), Prof., Leading Researcher; kulthp@mail.ru;

Magomed M. Payzulaev, Cand. Sci. (Eng), Assoc. Prof., Head of the Department Resistance of Materials, Theoretical and Construction Mechanics; smdstu@mail.ru

Shamil A. Omarov, Cand. Sci. (Eng), Assoc. Prof., Department of Resistance of Materials, Theoretical and Structural Mechanics, keger1963@mail.ru.

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/ Received 15.03.2024.

Одобрена после рецензирования / Revised 28.04.2024.

Принята в печать / Accepted for publication 28.04.2024.

Оптимизация стропильных и рамных конструкций

А.К. Юсупов, Х.М. Муселемов, Р.И. Вишталов

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

Резюме. Цель. Фермы и рамы находят широкое применение при проектировании и строительстве зданий и сооружений, поскольку обладают большой несущей способностью и жёсткостью. В то же время они имеют значительную массу. С целью уменьшения массы и стоимости стропильных и рамных конструкций в настоящей статье разрабатываются оптимальные конструктивные и расчётные схемы, применяя стали различной прочности. **Метод.** Исследование основано на теории и методах оптимизации конструкций. Путем исследования особенностей работы рам и ферм определяются наиболее нагруженные элементы конструкций. В соответствии с этим подбираются стали различной прочности, что обеспечивает уменьшение массы конструкции и её стоимости. Сравнивая различные конструктивные и расчётные схемы, предлагаются оптимальное распределение стале́й различной прочности по пролёту конструкций. **Результат.** Разработанные конструктивные и расчётные схемы позволяют уменьшить массу и стоимость рам и ферм на основе оптимального распределения стале́й различной марки. **Вывод.** Предложенные решения могут найти применение в практике проектирования и строительства металлических конструкций. Разработаны конструктивные схемы ферм и рам, где применяются стали различной прочности, которые по массе и стоимости выгодно отличаются от соответствующих конструкций, выполненных из стале́й одной прочности (одной марки).

Ключевые слова: стали, обычная и повышенная прочность, расчётные сопротивления, конструктивная и расчётная схемы, рамы, фермы, узлы, отправочные марки

Для цитирования: А.К. Юсупов, Х.М. Муселемов, Р.И. Вишталов. Оптимизация стропильных и рамных конструкций. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2024; 51(3): 215-226. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-3-215-226

Optimization of Rafter and Frame structures

A.K. Yusupov, Kh.M. Muselemov, R.I. Vishtalov

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

Abstract. Objective. Trusses and frames are widely used in the design and construction of buildings and structures, since they have high load-bearing capacity and rigidity. At the same time, they have a significant mass. In order to reduce the mass and cost of rafter and frame structures, this article develops optimal design and calculation schemes using steels of different strengths. **Method.** The study is based on the theory and methods of design optimization. By studying the features of the frame and truss operation, the most loaded elements of the structures are determined. In accordance with this, steels of different strengths are selected, which ensures a decrease in the mass of the structure and its cost. Comparing various design and calculation schemes, the optimal distribution of steels of different strengths along the span of the structures is proposed. **Result.** The developed design and calculation schemes make it possible to reduce the mass and cost of frames and trusses by optimally distributing steels of different

grades. **Conclusion.** The proposed solutions can find application in the practice of designing and constructing metal structures. Structural schemes of trusses and frames have been developed, where steels of different strengths are used, which in terms of weight and cost compare favorably with corresponding structures made of steels of the same strength (one grade).

Keywords: steels, normal strength, increased strength, design resistances, structural scheme, calculation scheme, frames, trusses, units, shipping grades

For citation: A.K. Yusupov, Kh.M. Muselemov, R.I. Vishtalov. Optimization of Rafter and Frame structures. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2024;51(3): 215-226. DOI:10.21822 /2073-6185-2024-51-3-215-226

Введение. Внутренние усилия в элементах ферм и рам меняются по пролету здания [1,9,10]. Обычно в соответствии с переменными эпюрами изгибающих моментов и поперечных сил, при проектировании рам и ферм применяют переменные сечения [2, 5-8] элементов по пролету здания. Такое решение обеспечивает уменьшение собственного веса всей конструкции. При этом технология изготовления отдельных узлов конструкции [1-3] существенно усложняется.

В целом конструкция становится по стоимости дороже. Как показывают ранее проведенные нами исследования, уменьшение собственного веса конструкции рационально обеспечивать, применяя в несущих элементах сталей различной прочности: в перегруженных отправочных марках рам и ферм — стали повышенной прочности, а в менее загруженных марках — стали обычной прочности. При этом, сохраняя сечения элементов отправочных марок без изменения, что повышают технологию изготовления, транспортировки и монтажа рам и ферм. Таким образом, в случае применения сталей различной прочности собственный вес конструкции существенно уменьшается, технология изготовления упрощается, при этом стоимость конструкции в целом, как показывают исследования, также снижается.

Постановка задачи. Внутренние усилия в элементах ферм и рам меняются по пролету здания, что дает возможность оптимизировать собственный вес конструкции в целом: в более загруженных участках применять стали повышенной прочности, а на участках, менее загруженных, применять стали обычной прочности. Компонуя рамы и фермы из отдельных отправочных марок, можно обеспечивать оптимальное распределение сталей по пролету конструкции: одни отправочные марки компоновать из сталей повышенной прочности, другие – из сталей обычной прочности. Поскольку применение сталей различной прочности уменьшает массу конструкции стоимость стали также уменьшается. Это происходит за счёт того, что масса конструкции падает быстрее, чем стоимость самой стали. На конкретных примерах рассмотрены затронутые здесь вопросы.

Методы исследования. По очертанию различают фермы треугольного очертания, трапециевидные, с параллельными поясами, полигональные (рис. 1-4):

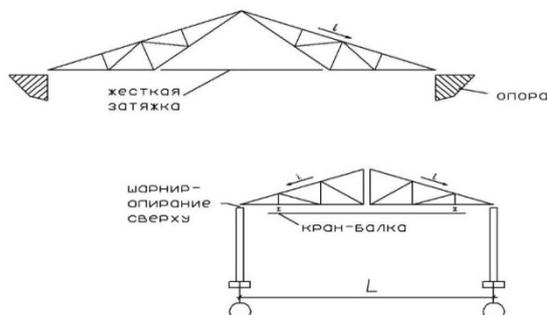


Рис.1. Конструктивные схемы ферм треугольного очертания

Fig. 1. Structural diagrams of triangular trusses

Применяются в районах, где большие атмосферные осадки; уклон l — большой; в зданиях, где нет мостовых кранов (в складских помещениях), поскольку сопряжение фермы с колонной — шарнирное. Недостатки: много разнотипных элементов — стержней и узлов, что усложняет технологию изготовления; опорные части фермы слабы, а средняя часть ее недогружена.

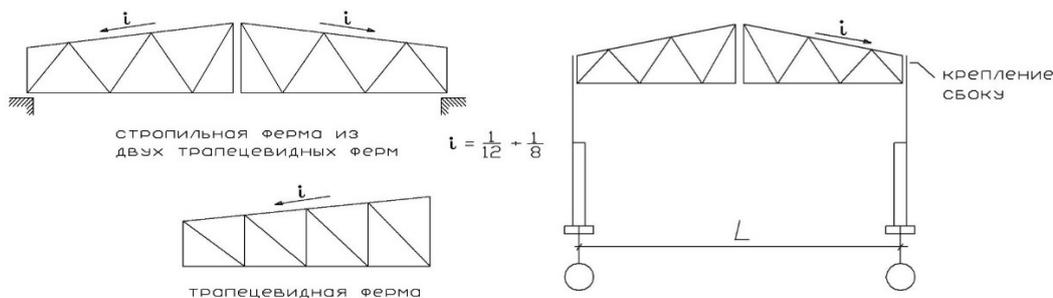


Рис. 2. Конструктивные схемы ферм трапециевидного очертания
Fig. 2. Structural diagrams of trapezoidal trusses

Позволяют обеспечивать жесткое крепление колонны с ригелем – применяются в производственных зданиях с мостовыми кранами (рис.2).

Преимущества: более или менее очертание фермы соответствует эпюре изгибающих моментов и поперечных сил по пролету; естественный водоотвод.

Недостатки: слишком много разнотипных элементов – стержней, узлов, что повышает трудоемкость изготовления конструкции.

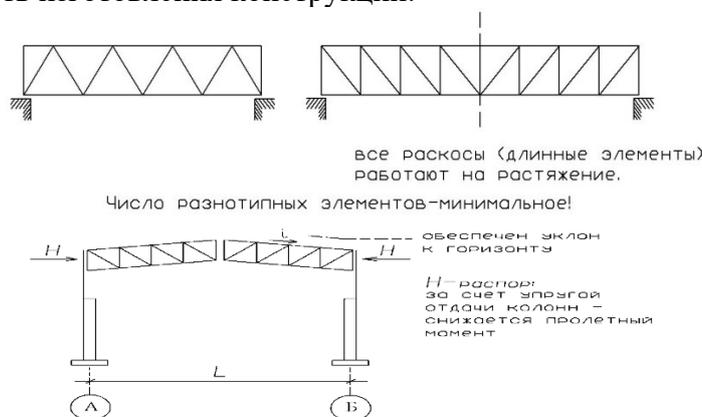


Рис. 3. Конструктивные схемы ферм с параллельными поясами
Fig. 3. Structural diagrams of trusses with parallel chords

При проектировании сквозных систем, в частности ферм, надо стремиться к тому, чтобы длинные элементы работали на растяжение (проблема устойчивости решается), а короткие – на сжатие, поскольку обеспечить устойчивость коротких элементов легче:

$$F_{кр} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{(\mu \cdot l)^2} \cdot$$

Небольшие изменения длины «*l*» значительно влияют на критическую силу $F_{кр}$.

Недостатки: затруднен естественный водоотвод; средняя часть перегружена. Эту проблему решают путем устройства строительного подъема. Фермы с параллельными поясами – самые современные и технологичны при изготовлении.

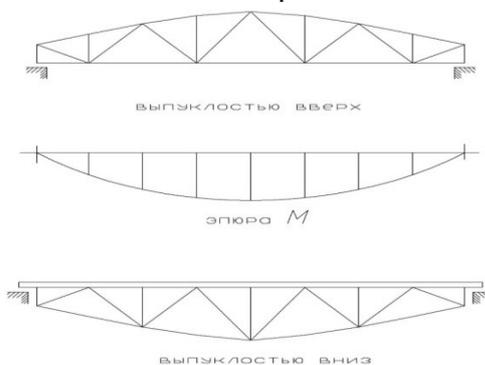


Рис. 4. Конструктивные схемы полигональных ферм
Fig. 4. Structural schemes of polygonal trusses

Очертания тяжелых ферм повторяют вид эпюры моментов по пролету. Полигональные фермы применяются в основном в мостовых конструкциях (рис. 4). Полигональные

фермы относятся к тяжелым. Очертание фермы, повторяя вид эпюры изгибающих моментов, уменьшает усилия в элементах. Отправочные марки тяжелых ферм в зависимости от веса могут быть в виде отдельных панелей фермы или отдельных стержней.

Рассмотренные выше конструктивные схемы рационально компоновать из сталей различной прочности (рис. 5-8).

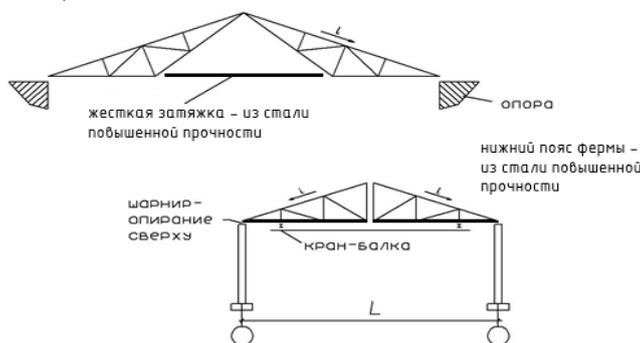


Рис. 5. Схема расположения сталей повышенной прочности в фермах треугольного очертания (жирные линии)

Fig. 5. Layout of high-strength steels in triangular trusses (thick lines)

Применяются в районах, где большие атмосферные осадки; уклон l – большой; в зданиях, где нет мостовых кранов (в складских помещениях), поскольку сопряжение фермы с колонной – шарнирное. Недостатки: много разнотипных элементов – стержней и узлов, что усложняет технологию изготовления; опорные части фермы слабы, а средняя часть ее недогружена.

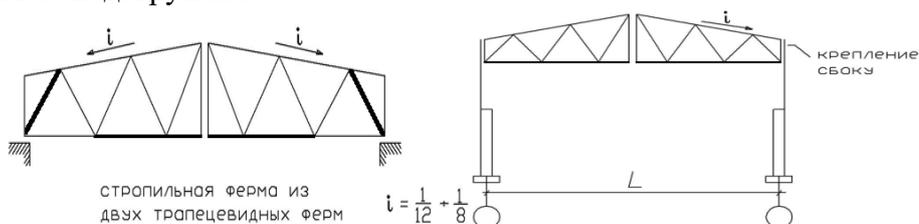


Рис. 6. Варианты расположения сталей повышенной прочности в трапецевидных фермах (жирные линии)

Fig. 6. Variants of the arrangement of high-strength steels in trapezoidal trusses (thick lines)

В средней части пролета нижние пояса фермы перегружены, а у опор не догружены. Опорные восходящие раскосы также перегружены. Поэтому эти элементы рационально проектировать из стали повышенной прочности. Все остальные стержни фермы – из стали обычной прочности. На схеме стержни из стали повышенной прочности показаны жирными линиями. Здесь нижний пояс фермы выполняется из стали повышенной прочности.

Преимущества: более или менее очертание фермы соответствует эпюре изгибающих моментов и поперечных сил по пролету; естественный водоотвод.

Недостатки: слишком много разнотипных элементов – стержней, узлов, что повышает трудоемкость изготовления конструкции.

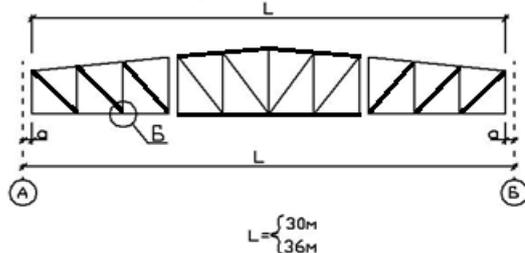


Рис.7. Схема расположения сталей повышенной прочности в фермах из 3-ех отправочных марок (жирные линии)

Fig. 7. Layout of high-strength steels in trusses from 3 shipping grades (thick lines)

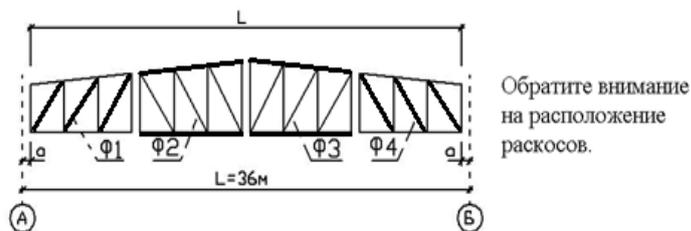


Рис. 8. Схема расположения сталей повышенной прочности в фермах из 4-ех отправочных марок (жирные линии)

Fig. 8. Layout of high-strength steels in trusses of 4 shipping grades (thick lines)

Поскольку пояса в основном воспринимают изгибающие моменты, а раскосы – поперечные силы, то пояса отправочных марок, которые находятся в средней части пролета, выполняем из сталей повышенной прочности. Раскосы отправочных марок у опор также выполняем из сталей обычной прочности. Все остальные стержни фермы – из стали обычной прочности. Стержни из сталей повышенной прочности на схеме показаны жирными линиями.

Обсуждение результатов. При проектировании большепролетных рамных конструкций необходимо стремиться к уменьшению собственного веса несущих элементов, так как для большепролетной конструкции основной нагрузкой является её собственный вес [4,11]. С другой стороны, применение сталей обычной прочности усложняет отдельные узлы из-за того, что прокатные листы или прокатные профили, из которых komponуется рама, получаются очень толстыми. Этот фактор существенно усложняет компоновку рамы и ее узлы. Стоимость стали рамы становится также существенно высокой при применении сталей обычной прочности. Поскольку внутренние усилия в сечении рамы меняются по контуру этой рамы, следует считать рациональным проектировать большепролетные рамы из двух или трёх сталей различной прочности: стали обычной прочности, стали повышенной прочности. Высокопрочные стали применяются редко.

В статье мы рассматриваем вопросы проектирования многостальных рам. На рис. 9 представлена конструктивная схема большепролетной рамы из отправочных марок.

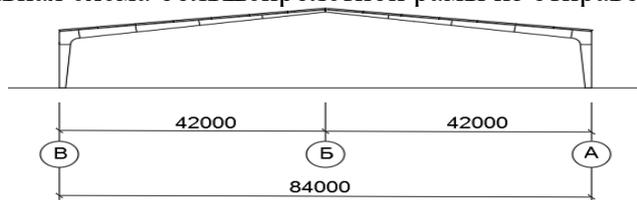


Рис. 9. Поперечный разрез большепролетной рамы, скомпонованной из отдельных отправочных марок

Fig. 9. Cross-section of a large-span frame assembled from individual shipping marks

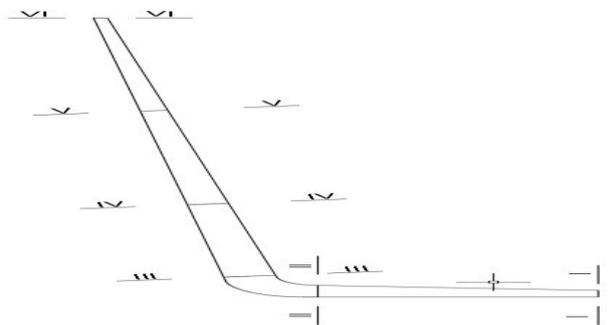


Рис. 10. Конструктивная схема полурамы
Fig. 10. Structural diagram of the semi-frame

На рис. 10 дается конструктивная схема полурамы и соответствующие расчетные сечения (всего 6 сечений). С учетом всех нагрузок, действующих на раму: собственный вес, снеговая нагрузка, односторонняя, симметричная, ветровая нагрузка – были определены внутренние усилия в расчетных сечениях полурамы.

Пропуская промежуточные расчётные операции, приводим окончательную таблицу внутренних усилий в сечениях (табл.1).

Таблица 1. Усилия и моменты в сечениях рамы
Table 1. Forces and moments in frame sections

№	Наименование нагрузки	Усилия и моменты в сечениях рамы Forces and moments in frame sections																	
		I-I M Q N			II-II M Q N			III-III M Q N			IV-IV M Q N			V-V M Q N			VI-VI M Q N		
1	Постоянная Constant	0	335,2	287,3	4357,1	335,2	287,3	4357,1	287,3	335,2	1564,1	191,5	335,2	111,7	95,8	335,2	0	0	335,16
2	Снеговая Snowy	0	1342,6	1150,8	17453,8	1342,6	1150,8	17453,8	1150,8	1342,6	7854,7	767,2	1342,6	447,5	383,6	1342,6	0	0	1342,6
3	Снеговая односторонняя (слева) Snow one-sided (left)	0	671,3	287,7	8726,9	671,3	287,7	8726,9	287,7	671,3	5817,9	287,7	671,3	2909	287,7	671,3	0	287,7	671,3
3*	Снеговая односторонняя (справа) Snow one-sided (right)	0	671,3	863,1	8726,9	671,3	863,1	8726,9	863,1	671,3	447,5	479,5	671,3	-2461,4	95,9	671,3	0	-287,7	671,3
4	Ветровая (слева) Wind (left)	0	-28,3	-5	-203,6	-3,2	-5	-203,6	-5	-3,2	-91,6	-5	-1,4	-5,2	-5	-0,5	0	-5	2,3
4*	Ветровая (справа) Wind (right)	0	-23,9	5	-187,8	-5,1	5	-187,8	5	-5,1	-85,4	5	-4,2	-4,8	5	-3,3	0	5	-2,3

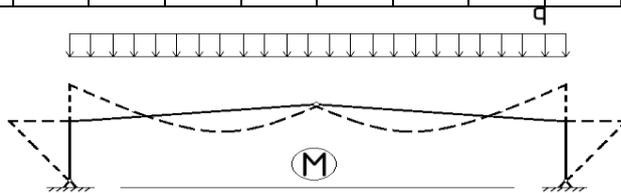


Рис. 11. Эпюра изгибающих моментов в трехшарнирной раме
Fig. 11. Bending moment diagram in a three-hinged frame

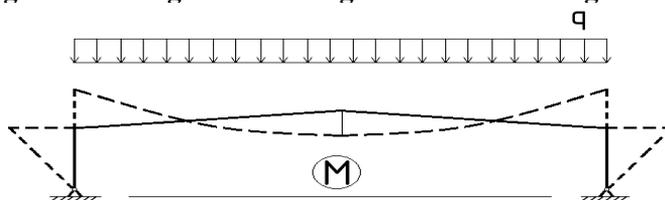


Рис. 12. Эпюра изгибающих моментов в двухшарнирной раме
Fig. 12. Bending moment diagram in a double-hinged frame

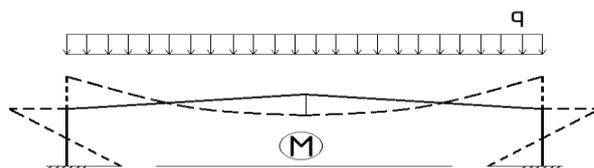


Рис. 13. Эпюра изгибающих моментов в бесшарнирной раме
Fig. 13. Bending moment diagram in a hingeless frame

Из рис. 11 – 13 видно, что опорный карнизный узел и прилежащие к нему участки рамы – перегружены изгибающими моментами. Прокатные листы на этих участках будут очень толстыми по сравнению с листами на других участках рамы. Слишком толстые листы не позволяют соединять элементы с помощью сварных швов. В таких случаях обычно применяют болтовые сопряжения.

Эту проблему можно решить иначе, в перегруженных участках, о которых говорилось выше, лучше применять стали повышенной прочности. Приведем конструктивные схемы многостальных рам, где применяются стали обычной прочности и стали повышенной прочности. Требуется подобрать сечение полурамы однопролетного производствен-

ного здания. Рассматриваются 6 сечений. Конструктивная схема и расчетные сечения полурамы показаны на рис. 10. Расчётные усилия в рассматриваемых сечениях были уже определены выше и даны в табл.1.

При подборе сечения необходимо соблюдать технологичность изготовления конструкции. Рама – трехшарнирная. В сечении рама представляет собой двутавр. Изначально зададимся геометрическими размерами и маркой стали, затем подберём сечение согласно 4-ой теории прочности [9].

Подбор размеров Сечение I-I:

Усилия в сечении

$$M = 0 \text{ кН}\cdot\text{м}$$

$$Q = 1522 \text{ кН}$$

$$N = 1327,4 \text{ кН}$$

Высота сечения $H = 1000$ мм.

Ширина полков $B = 1000$ мм.

Толщина стенки $b = 10$ мм.

Толщина поясов $h_1 = 20$ мм.

Площадь двутавра

$$A = 2 * B * h_1 + b * h = 2 * 100 * 20 + 10 * 960 = 4960 \text{ см}^2$$

Момент инерции

$$J_x = (B * H^3 - 2 * b * h^3) / 12 = (1000 * 1000^3 - 2 * 10 * 960^3) / 12 = 1034261.3 \text{ см}^4.$$

Момент сопротивления

$$W = (B * H^3 - 2 * b * h^3) / (6 * H) = (1000 * 1000^3 - 2 * 10 * 960^3) / (6 * 1000) = 20685.2 \text{ см}^3.$$

Напряжение от изгиба

$$\sigma_{и} = \frac{M}{W} = 0 < y \cdot R = 0.9 \cdot 24 = 21.6 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2};$$

Напряжение от сжатия

$$\sigma_{сж} = \frac{N}{A} = \frac{1327.4}{496} = 2.7 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} < y \cdot R = 0.9 \cdot 24 = 21.6 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2};$$

Касательные напряжения

$$\tau = \frac{Q \cdot S}{J \cdot b} = \frac{1522 \cdot 10912}{1034261.3 \cdot 10} = 14 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} < y \cdot R = 0.9 \cdot 24 = 21.6 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2};$$

Условие прочности по 4-й теории прочности

$$\sigma = \sqrt{(\sigma_{и} + \sigma_{сж})^2 + 3\tau^2} < y \cdot R;$$

В середине сечения $\sigma_{и} = 0$

$$\sigma = \sqrt{(\sigma_{сж})^2 + 3\tau^2} = \sqrt{(2.7)^2 + 3 \cdot 14^2} = 24.4 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} > y \cdot R = 0.9 \cdot 24 = 21.6 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2};$$

В нижних фибрах

$$\sigma = \sqrt{(\sigma_{и} + \sigma_{сж})^2} = \sqrt{(0 + 2.7)^2} = 2.7 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} < y \cdot R = 0.9 \cdot 24 = 21.6 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2};$$

Применяем сталь с сопротивлением 440 МПа находим запас прочности:

$$\frac{y \cdot R - \sigma}{y \cdot R} = 0.445 = 44.5\%;$$

Запас прочности превышает 5 процентов, но для соблюдения технологичности утверждаем данную марку.

Подбор размеров Сечение II-II:

Усилия в сечении

$$M = 19896.5 \text{ кН}\cdot\text{м}$$

$$Q = 1540.8 \text{ кН}$$

$$N = 1327.4 \text{ кН}$$

Высота сечения $H = 2000$ мм.

Ширина полков $B = 1200$ мм.

Толщина стенки $b = 10$ мм.

Толщина поясов $h_1 = 20$ мм.

Площадь двутавра

$$A = 2 * B * h_1 + b * h = 2 * 120 * 2 + 1 * 196.0 = 676.0 \text{ см}^2$$

Момент инерции

$$J_x = (B * H^3 - 2 * b * h^3) / 12 = (120 * 200^3 - 2 * 59.50 * 196.0^3) / 12 = 5332101.3 \text{ см}^4.$$

Момент сопротивления

$$W = (B * H^3 - 2 * b * h^3) / (6 * H) = (120 * 200^3 - 2 * 59.50 * 196.0^3) / (6 * 200) = 53321.0 \text{ см}^3.$$

Напряжение от изгиба

$$\sigma_{и} = \frac{M}{W} = \frac{1989650}{53321} = 37.3 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} < y \cdot R = 0.9 \cdot 44 = 39.6 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2};$$

Напряжение от сжатия

$$\sigma_{сж} = \frac{N}{A} = \frac{1327.4}{676} = 2 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} < y \cdot R = 0.9 \cdot 44 = 39.6 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2};$$

Касательные напряжения

$$\tau = \frac{Q \cdot S}{J \cdot b} = \frac{1540.8 \cdot 20424.5}{5332101.3 \cdot 1} = 5.9 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} < y \cdot R = 0.9 \cdot 44 = 39.6 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2};$$

Условие прочности по 4-й теории прочности

$$\sigma = \sqrt{(\sigma_{и} + \sigma_{сж})^2 + 3\tau^2} < y \cdot R;$$

В середине сечения $\sigma_{и} = 0$

$$\sigma = \sqrt{(\sigma_{сж})^2 + 3\tau^2} = \sqrt{(2)^2 + 3 \cdot 5.9^2} = 10.4 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} < y \cdot R = 0.9 \cdot 44 = 39.6 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2};$$

В нижних фибрах

$$\sigma = \sqrt{(\sigma_{и} + \sigma_{сж})^2} = \sqrt{(37.3 + 2)^2} = 39.3 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} < y \cdot R = 0.9 \cdot 44 = 39.6 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2};$$

Применяем сталь с сопротивлением 440 МПа находим запас прочности:

$$\frac{y \cdot R - \sigma}{y \cdot R} = 0.0075 = 0.75\%;$$

В пределах 5 процентов применяем данную сталь.

Подбор размеров

Сечение III-III:

Усилия в сечении

$$M = 19896.5 \text{ кН} \cdot \text{м}$$

$$Q = 1327.4 \text{ кН}$$

$$N = 1540.8 \text{ кН}$$

Высота сечения $H = 2000 \text{ мм}$.

Ширина полков $B = 1200 \text{ мм}$.

Толщина стенки $b = 10 \text{ мм}$.

Толщина поясов $h_1 = 20 \text{ мм}$.

Площадь двутавра

$$A = 2 * B * h_1 + b * h = 2 * 120 * 2 + 1 * 196.0 = 676.0 \text{ см}^2$$

Момент инерции

$$J_x = (B * H^3 - 2 * b * h^3) / 12 = (120 * 200^3 - 2 * 59.50 * 196.0^3) / 12 = 5332101.3 \text{ см}^4.$$

Момент сопротивления

$$W = (B * H^3 - 2 * b * h^3) / (6 * H) = (120 * 200^3 - 2 * 59.50 * 196.0^3) / (6 * 200) = 53321.0 \text{ см}^3.$$

Напряжение от изгиба

$$\sigma_{и} = \frac{M}{W} = \frac{1989650}{53321} = 37.3 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} < y \cdot R = 0.9 \cdot 44 = 39.6 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2};$$

Напряжение от сжатия

$$\sigma_{сж} = \frac{N}{A} = \frac{1540.8}{676} = 2.3 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} < y \cdot R = 0.9 \cdot 44 = 39.6 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2};$$

Касательные напряжения

$$\tau = \frac{Q \cdot S}{J \cdot b} = \frac{1327.4 \cdot 20424.5}{5332101.3 \cdot 1} = 5.1 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} < y \cdot R = 0.9 \cdot 44 = 39.6 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2};$$

Условие прочности по 4-й теории прочности

$$\sigma = \sqrt{(\sigma_{и} + \sigma_{сж})^2 + 3\tau^2} < y \cdot R;$$

В середине сечения $\sigma_{и} = 0$

$$\sigma = \sqrt{(\sigma_{сж})^2 + 3\tau^2} = \sqrt{(2.3)^2 + 3 \cdot 5.1^2} = 9.1 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} < y \cdot R = 0.9 \cdot 44 = 39.6 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2};$$

В нижних фибрах

$$\sigma = \sqrt{(\sigma_{и} + \sigma_{сж})^2} = \sqrt{(37.3 + 2.3)^2} = 39.6 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} < y \cdot R = 0.9 \cdot 44 = 39.6 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2};$$

Применяем сталь с сопротивлением 440 МПа находим запас прочности:

$$\frac{y \cdot R - \sigma}{y \cdot R} = 0.00 = 0\%;$$

В пределах 5 процентов применяем данную сталь.

Подбор размеров Сечение IV-IV:

Усилия в сечении

$$M = 8556.4 \text{кН} \cdot \text{м}$$

$$Q = 886.5 \text{кН}$$

$$N = 1542.2 \text{кН}$$

Высота сечения $H = 1500$ мм.

Ширина полок $B = 1000$ мм.

Толщина стенки $b = 10$ мм.

Толщина поясов $h_1 = 20$ мм.

Площадь двутавра

$$A = 2 \cdot B \cdot h_1 + b \cdot h = 2 \cdot 100 \cdot 20 + 1 \cdot 146.0 = 546.0 \text{ см}^2$$

Момент инерции

$$J_x = (B \cdot H^3 - 2 \cdot b \cdot h^3) / 12 = (100 \cdot 150^3 - 2 \cdot 49.50 \cdot 146.0^3) / 12 = 2449878.0 \text{ см}^4.$$

Момент сопротивления

$$W = (B \cdot H^3 - 2 \cdot b \cdot h^3) / (6 \cdot H) = (100 \cdot 150^3 - 2 \cdot 49.50 \cdot 146.0^3) / (6 \cdot 150) = 32665.0 \text{ см}^3.$$

Напряжение от изгиба

$$\sigma_{и} = \frac{M}{W} = \frac{855640}{32665} = 26.2 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} < y \cdot R = 0.9 \cdot 33 = 29.7 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2};$$

Напряжение от сжатия

$$\sigma_{сж} = \frac{N}{A} = \frac{1542.2}{546} = 2.8 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} < y \cdot R = 0.9 \cdot 33 = 29.7 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2};$$

Касательные напряжения

$$\tau = \frac{Q \cdot S}{J \cdot b} = \frac{886.5 \cdot 17464.5}{2449878 \cdot 1} = 6.3 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} < y \cdot R = 0.9 \cdot 33 = 29.7 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2};$$

Условие прочности по 4-й теории прочности

$$\sigma = \sqrt{(\sigma_{и} + \sigma_{сж})^2 + 3\tau^2} < y \cdot R;$$

В середине сечения $\sigma_{и} = 0$

$$\sigma = \sqrt{(\sigma_{сж})^2 + 3\tau^2} = \sqrt{(2.8)^2 + 3 \cdot 6.3^2} = 11.3 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} < y \cdot R = 0.9 \cdot 33 = 29.7 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2};$$

В нижних фибрах

$$\sigma = \sqrt{(\sigma_{и} + \sigma_{сж})^2} = \sqrt{(26.2 + 2.8)^2} = 29 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} < y \cdot R = 0.9 \cdot 33 = 29.7 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2};$$

Применяем сталь с сопротивлением 440 МПа находим запас прочности:

$$\frac{y \cdot R - \sigma}{y \cdot R} = 0.3409 = 34.09\%;$$

Запас прочности превышает 5 процентов, но для соблюдения технологичности утверждаем данную марку. Применяем сталь с сопротивлением 330 МПа для другого элемента находим запас прочности:

$$\frac{y \cdot R - \sigma}{y \cdot R} = 0.0241 = 2.41\%;$$

В пределах 5 процентов применяем данную сталь.

Подбор размеров

Сечение V-V:

Усилия в сечении

$$M = 2725.1 \text{ кН}\cdot\text{м}$$

$$Q = 445.5 \text{ кН}$$

$$N = 1543.1 \text{ кН}$$

Высота сечения $H = 1000$ мм.

Ширина полков $B = 1000$ мм.

Толщина стенки $b = 10$ мм.

Толщина поясов $h_1 = 20$ мм.

Площадь двутавра

$$A = 2 \cdot B \cdot h_1 + b \cdot h = 2 \cdot 100 \cdot 2 + 1 \cdot 96.00 = 496.0 \text{ см}^2$$

Момент инерции

$$J_x = (B \cdot H^3 - 2 \cdot b \cdot h^3) / 12 = (100 \cdot 100^3 - 2 \cdot 49.50 \cdot 96.00^3) / 12 = 1034261.3 \text{ см}^4.$$

Момент сопротивления

$$W = (B \cdot H^3 - 2 \cdot b \cdot h^3) / (6 \cdot H) = (100 \cdot 100^3 - 2 \cdot 49.50 \cdot 96.00^3) / (6 \cdot 100) = 20685.2 \text{ см}^3.$$

Напряжение от изгиба

$$\sigma_{\text{и}} = \frac{M}{W} = \frac{272510}{20685.2} = 13.2 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} < y \cdot R = 0.9 \cdot 22 = 19.8 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2};$$

Напряжение от сжатия

$$\sigma_{\text{сж}} = \frac{N}{A} = \frac{1543.1}{496} = 3.1 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} < y \cdot R = 0.9 \cdot 22 = 19.8 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2};$$

Касательные напряжения

$$\tau = \frac{Q \cdot S}{J \cdot b} = \frac{445.5 \cdot 10912}{1034261.3 \cdot 1} = 4.7 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} < y \cdot R = 0.9 \cdot 22 = 19.8 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2};$$

Условие прочности по 4-й теории прочности

$$\sigma = \sqrt{(\sigma_{\text{и}} + \sigma_{\text{сж}})^2 + 3\tau^2} < y \cdot R;$$

В середине сечения $\sigma_{\text{и}} = 0$

$$\sigma = \sqrt{(\sigma_{\text{сж}})^2 + 3\tau^2} = \sqrt{(3.1)^2 + 3 \cdot 4.7^2} = 8.7 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} < y \cdot R = 0.9 \cdot 22 = 19.8 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2};$$

В нижних фибрах

$$\sigma = \sqrt{(\sigma_{\text{и}} + \sigma_{\text{сж}})^2} = \sqrt{(13.2 + 6.3)^2} = 19.5 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} < y \cdot R = 0.9 \cdot 22 = 19.8 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2};$$

Применяем сталь с сопротивлением 330 МПа находим запас прочности:

$$\frac{y \cdot R - \sigma}{y \cdot R} = 0.3434 = 34.34\%;$$

Запас прочности превышает 5 процентов, но для соблюдения технологичности утверждаем данную марку. Применяем сталь с сопротивлением 220 Мпа для другого элемента находим запас прочности:

$$\frac{y \cdot R - \sigma}{y \cdot R} = 0.0151 = 1.51\%;$$

В пределах 5 процентов применяем данную сталь.

Подбор размеров

Сечение VI-VI:

Усилия в сечении

$$M = 0 \text{ кН}\cdot\text{м}$$

$$Q = 254.4 \text{ кН}$$

$$N = 1545.7 \text{ кН}$$

Высота сечения $H = 500$ мм.

Ширина полков $B = 500$ мм.

Толщина стенки $b = 10$ мм.

Толщина поясов $h_1 = 20$ мм.

Площадь двутавра

$$A = 2 * B * h_1 + b * h = 2 * 50 * 2 + 1 * 46.00 = 246.0 \text{ см}^2$$

Момент инерции

$$J_x = (B * H^3 - 2 * b * h^3) / 12 = (50 * 50^3 - 2 * 24.50 * 46.00^3) / 12 = 123378.0 \text{ см}^4.$$

Момент сопротивления

$$W = (B * H^3 - 2 * b * h^3) / (6 * H) = (50 * 50^3 - 2 * 24.50 * 46.00^3) / (6 * 50) = 4935.1 \text{ см}^3.$$

Напряжение от изгиба

$$\sigma_{и} = \frac{M}{W} = 0 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} < y \cdot R = 0.9 \cdot 22 = 19.8 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2};$$

Напряжение от сжатия

$$\sigma_{сж} = \frac{N}{A} = \frac{1545.7}{246} = 6.3 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} < y \cdot R = 0.9 \cdot 22 = 19.8 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2};$$

Касательные напряжения

$$\tau = \frac{Q \cdot S}{J \cdot b} = \frac{254.4 \cdot 2664.5}{123378 \cdot 1} = 5.5 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} < y \cdot R = 0.9 \cdot 22 = 19.8 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2};$$

Условие прочности по 4-й теории прочности

$$\sigma = \sqrt{(\sigma_{и} + \sigma_{сж})^2 + 3\tau^2} < y \cdot R;$$

В середине сечения $\sigma_{и} = 0$

$$\sigma = \sqrt{(\sigma_{сж})^2 + 3\tau^2} = \sqrt{(6.3)^2 + 3 \cdot 5.5^2} = 11.4 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} < y \cdot R = 0.9 \cdot 22 = 19.8 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2};$$

В нижних фибрах

$$\sigma = \sqrt{(\sigma_{и} + \sigma_{сж})^2} = \sqrt{(0 + 6.3)^2} = 6.3 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} < y \cdot R = 0.9 \cdot 22 = 19.8 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2};$$

Применяем сталь с сопротивлением 220 МПа, находим запас прочности

$$\frac{y \cdot R - \sigma}{y \cdot R} = 0.4242 = 42.42\%;$$

Запас прочности превышает 5 процентов, но для соблюдения технологичности изготовления утверждаем данную марку. Компонуем полураму из сталей различной прочности.

На рис. 14 дана конструктивная схема полурамы, скомпонованная из отправочных марок, изготовленных из стали различной прочности. Сравнивая эпюры изгибающих моментов (рис.11) и конструктивную схему полурамы, приведенной на рис. 14, можно сделать вывод: отправочные марки 1,2 и 3 (рис.14) перегружены.



Рис. 14. Схема компоновки полурамы из отправочных марок

Fig. 14. Layout diagram of a semi-frame made of shipping marks

Поэтому эти отправочные марки рационально изготавливать из сталей различной прочности: отправочные марки 1 и 3 (рис.14) – из стали повышенной прочности: марка 09ГС-гр.1 с расчетным сопротивлением $R = 335$ МПа ; отправочная марка 2 – из стали повышенной прочности: марка 09ГС-гр.2 с расчетным сопротивлением $R = 355$ МПа ; отправочные марки 4 и 5 – из стали обычной прочности: марка ВстЗсп5-1 с расчетным сопротивлением $R = 240$ МПа.

Толщина листов отправочной марки 2, в случае применения вместо стали обычной прочности – стали повышенной прочностью с $R = 355$ МПа, уменьшается на 33 %. Толщина листов отправочных марок 1 и 3, в случае применения вместо стали обычной прочности – стали повышенной прочности с $R = 335$ МПа, уменьшается на 29 %.

Вывод. В результате проведенного исследования изучены бистальные фермы, даны конструктивные схемы и приведен пример расчета.

Рассмотрены многостальные рамы: даны конструктивные и расчетные схемы, приведены примеры компоновки многостальных рам с указанием отправочных марок, которые выполняются из сталей различной прочности. Дана оценка влияния применения сталей повышенной прочности на параметры сечения элементов рамы.

Полученные в статье результаты, разработанные схемы многостальных конструкции, а также методы их расчета могут найти применение при проектировании ферм и рамных конструкций.

Библиографический список:

1. Металлические конструкции. Ю.И. Кудишина, Москва, Академия, 2008. - 691с.
2. Металлические конструкции, Е.И. Беленя, Москва, Стройиздат, 1986. - 560 с.
3. Металлические конструкции (специальный курс) – 2-е изд. под редакцией Беленя Е.Н., Москва, Стройиздат, 1976. – 600 с.
4. Шерешевский И.А. Конструирования промышленных зданий и сооружений. – Москва, Стройиздат, 1979.
5. Рекомендации по проектированию конструкций каркаса. – Э.Л. Айрумян, Москва, 2004.- 242с.
6. Материалы по металлическим конструкциям – Москва, 1977.- 215с.
7. Металлические конструкции. В.К. Файбишенко, Москва, Стройиздат, 1984.-336с.
8. Металлические конструкции в вопросах, в ответах и в проектировании» Юсупов А.К. ДГТУ, Махачкала. ГУП «Типография ДНЦ РАН». 2010 -100с.
9. СП 16.13330.2017 «Стальные конструкции». Свод правил. Москва, Стройиздат, 2017. - 126 с.
10. СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия». Свод правил – Москва, Стройиздат, 2016. – 95 с.
11. Дыховичный Ю.А. Большепролетные конструкции сооружений Олимпиады – 80 в Москве. - Москва, Стройиздат, 1982. – 277 с.

References:

1. Metal structures. Yu.I. Kudishina, Moscow, Academy, 2008; 691. (In Russ)
2. Metal structures, E.I. Belenya, Moscow, Stroyizdat, 1986; 560. (In Russ)
3. Metal structures (special course) – 2nd ed. edited by Belen E.N., Moscow, Stroiizdat, 1976; 600. (In Russ)
4. Shereshevsky I.A. Design of industrial buildings and structures. – Moscow, Stroyizdat, 1979. (In Russ)
5. Recommendations for the design of frame structures. E.L. Ayrumyan, Moscow, 2004; 242. (In Russ)
6. Materials on metal structures. Moscow, 1977; 215. (In Russ)
7. Metal structures. V.C. Faybishenko, Moscow, Stroyizdat, 1984;336. (In Russ)
8. Metal structures in questions, answers and design” Yusupov A.K. DSTU, Makhachkala. State Unitary Enterprise "Printing House of the DSC RAS". 2010;100. (In Russ)
9. SP 16.13330.2017 “Steel structures”. Set of rules. Moscow, Stroiizdat, 2017; 126. (In Russ)
10. SP 20.13330.2016 “Loads and impacts.” Code of rules. Moscow, Stroiizdat, 2016; 95(In Russ)
11. Dykhovichny Yu.A. Large-span structures of the Olympics-80 buildings in Moscow. - Moscow, Stroyizdat, 1982; 277. (In Russ)

Сведения об авторах:

Юсупов Абусупян Курашевич, доктор технических наук, профессор, кафедра «Строительные конструкции и гидротехнические сооружения»; hairulla213@mail.ru

Муселемов Хайрулла Магомедмурадович, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Строительные конструкции и гидротехнические сооружения»; hairulla213@mail.ru

Вишталов Раджаб Исабекович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительные конструкции и гидротехнические сооружения»; hairulla213@mail.ru

Information about the authors:

Abusupyan K.Yusupov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Department of Building Structures and Hydraulic Structures; hairulla213@mail.ru

Hairulla M.Muselemov, Dr. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Head of the Department of Building Structures and Hydraulic Structures; hairulla213@mail.ru

Rajab I. Vishtalov, Cand.Sci. (Eng.), Assoc. Prof. Department of Building Structures and Hydro-technical Structures; hairulla213@mail.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 25.04.2024.

Одобрена после рецензирования/ Reved 25.06.2024.

Принята в печать/Accepted for publication 25.06. 2024.

**Моделирование ползучести деревянной балки прямоугольного сечения
при длительной статической нагрузке**

Б.М. Языев¹, Сун Сюаньчжэнь¹, М.А. Магомедов², С.В. Литвинов¹, В.В. Кузнецов¹

¹Донской государственной университет,

¹344003, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина 1, Россия

²Дагестанский государственный технический университет,

²367026, РД, г. Махачкала, проспект Имама Шамиля, 70, Россия

Резюме. Цель. В зависимости от уровня напряжений, работа деревянных балок при длительной нагрузке характеризуется как линейной, так и нелинейной ползучестью. Это показали многочисленные экспериментальные исследования древесины. Однако теоретического описание данных процессов мало изучено или представлено крайне редко. Отсюда следует, что одним из приоритетных направлений в расчетах элементов деревянных конструкций является вывод разрешающих уравнений линейной или нелинейной ползучести для различных видов напряженно-деформированного состояния. **Метод.** В качестве соотношений, устанавливающих связь между напряжениями и деформациями, используются уравнение Максвелла-Томсона. Методика апробирована путем сравнения решения с расчетом известных исследователей. Приведен пример расчета для различных граничных условий закрепления балки прямоугольного поперечного сечения, загруженной равномерно- распределенной нагрузкой. Величина прогиба определяется методом сеток. **Результат.** Разработана программа для расчета в пакете MATLAB с возможностью вариации исходных данных и выводом графика зависимости перемещений, изгибающего момента от времени. Приведено сравнение максимальной величины прогиба с аналитическим решением. Отмечено, что напряжения практически не меняются в процессе ползучести. **Вывод.** Предложенный подход может быть применен к анализу напряженно-деформированного состояния и несущей способности деревянных балок произвольного сечения. Ограничений по граничным условиям и вида нагружения нет, а материалом балки может быть не только дерево, но и стеклопластик.

Ключевые слова: ползучесть древесины, относительная деформация, уравнение связи Максвелла-Томсона, изгибающие моменты, переменная жесткость

Для цитирования: Б.М. Языев, Сун Сюаньчжэнь, М.А. Магомедов, С.В. Литвинов, В.В. Кузнецов. Моделирование ползучести деревянной балки прямоугольного сечения при длительной статической нагрузке. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2024; 51(3): 227-236. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-3-227-236

Simulation of creep of a rectangular wooden beam under prolonged static load

B.M. Yazyev¹, Song Xuanzhen¹, M.A. Magomedov², S.V. Litvinov¹, V.V. Kuznetsov¹

¹Don State University, 1344003,

¹Rostov-on-Don, Gagarin Square 1, Russia

²Daghestan State Technical University,

²70 I. Shamilya Ave., Makhachkala 367026, Russia

Abstract. Objective. Depending on the stress level, the operation of wooden beams under prolonged load is characterized by both linear and nonlinear creep. This has been shown by numerous experimental studies of wood. The theoretical description of these processes is poorly studied or presented extremely rarely. One of the priority areas in the calculations of

wooden structure elements is the derivation of resolving equations of linear or nonlinear creep for various types of stress-strain state. **Method.** The Maxwell-Thomson equations are used as relations establishing the relationship between stresses and deformations. The technique was tested by comparing the solution with the calculation of well-known researchers. An example of calculation is given for various boundary conditions for fixing a beam of rectangular cross-section loaded with a uniformly distributed load. The deflection value is determined by the grid method. **Result.** A program has been developed for calculating in the MATLAB package with the possibility of varying the initial data and displaying a graph of the dependence of displacement, bending moment on time. The comparison of the maximum deflection value with the analytical solution is given. It is noted that the stresses practically do not change during creep. **Conclusion.** The proposed approach can be applied to the analysis of the stress-strain state and bearing capacity of wooden beams of arbitrary cross-section. There are no restrictions on boundary conditions and loading type, and the beam material can be not only wood, but also fiberglass.

Keywords: wood creep, relative deformation, Maxwell-Thomson constraint equation, bending moments, variable stiffness

For citation: B.M. Yazyev, Xuanzhen Song, M.A. Magomedov, S.V. Litvinov, V.V. Kuznetsov. Simulation of creep of a rectangular wooden beam under prolonged static load. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2024;51(3): 227-236. DOI:10.21822 /2073-6185-2024-51-3-227-236

Введение. Исследования работы древесины во времени можно разделить на два направления: длительная прочность древесины и ползучесть древесины. Оба направления исследований развиваются достаточно обособленно друг от друга, и большая часть трудов посвящена длительной прочности. Длительная нелинейность деформирования древесины исследована мало. Еврокод 5 [1,2] устанавливает обязательный принцип в расчете по предельным состояниям деревянных конструкций - учет ползучести древесины. Отечественный норматив ползучесть древесины в расчетных моделях конструкций не учитывает.

Современные модели ползучести древесины основаны на линейных теориях. Мгновенные свойства древесины в указанных исследованиях ползучести установлены на основе закона Гука, что не соответствует нелинейной диаграмме упругопластического типа, присущей сжатой древесине. На это обстоятельство обратил внимание К.П. Пятикрестовский [3,4]. Учет же мгновенных упругопластических деформаций в моделях ползучести древесины является сложной проблемой [5-9]. Без этого невозможно решить в рамках тех моделей ползучести древесины, которые разрабатываются в последние годы за рубежом и основываются на последовательном соединении различных линейных моделей [10-14].

Постановка задачи. Часто в уравнениях связи (состояния) для деревянных брусьев используется методика, учитывающая сложность процесса деформирования материала во времени с помощью разбиения процессов деформирования на соответствующие стадии, что позволяет заменить сложную нелинейную связь между напряжениями и деформациями кусочно-линейными зависимостями [10]. Эти этапы с их характерными особенностями можно наглядно продемонстрировать на рис. 1.

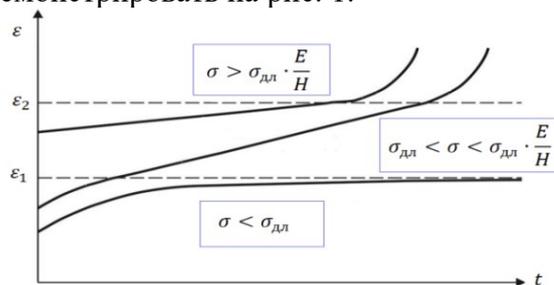


Рис. 1. Кривые деформирования при длительном действии статической нагрузки
Fig. 1. Deformation curves under prolonged action of static load

Из рис. 1 можно выделить [11]:

Первый этап деформирования – ползучесть является обратимой, подчиняется основным положениям линейной теории ползучести и описывается уравнением, называемым упрощенным законом линейной ползучести (уравнение Максвелла-Томсона)

$$n \cdot E_0 \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + H \varepsilon = \sigma + n \cdot \frac{\partial \sigma}{\partial t} \quad (1)$$

где E_0 – мгновенный начальный модуль деформаций, равный среднему значению модуля упругости (приложение СП 64.13330.2017); $H = (0,6 + 0,75) \cdot E_0$ – константа, имеющая физический смысл длительного модуля деформаций; σ, ε – напряжения и относительные деформации (текущие); n – время релаксации.

Второй этап деформирования – стадия установившейся ползучести

$$n \cdot E_0 \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \sigma + n \cdot \frac{\partial \sigma}{\partial t} - \sigma_{дл} \quad (2)$$

Третий этап деформирования – стадия с возрастающей скоростью деформирования

$$n \cdot E_0 \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} - B \cdot \varepsilon = \sigma + n \cdot \frac{\partial \sigma}{\partial t} - \sigma_{pp} \quad (3)$$

где B – константа, имеющая смысл модуля деформации при критическом нарастании деформаций; σ_{pp} – кратковременный предел прочности, равный нормативному сопротивлению древесины (приложение В СП 64.13330.2017); $\sigma_{дл} = 0,5 \cdot \sigma_{pp}$ – длительный предел прочности.

В настоящей статье рассматривается первый этап деформирования.

Методы исследования. Рассмотрим расчетные схемы, приведенные на рис. 2.

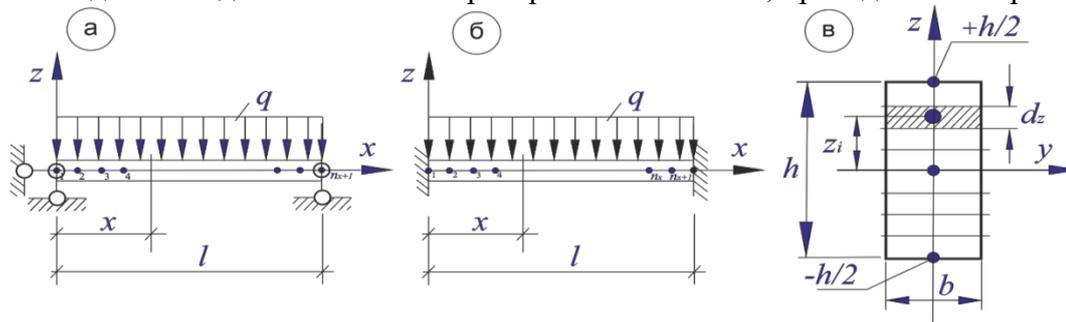


Рис. 2. Расчетные схемы задачи для балки прямоугольного сечения

Fig. 2. Calculation schemes of the problem for a rectangular beam

Полные деформации во времени будем представлять, как сумму составляющих упругой ε_{el} и деформации ползучести ε_{cr} .

$$\varepsilon = \varepsilon_{el} + \varepsilon_{cr} = \frac{\sigma}{E} + \varepsilon_{cr} \quad (4)$$

Рассматривая геометрическую сторону задачи, полную деформацию можно представить, как:

$$\varepsilon = -z \frac{d^2 w}{dx^2} \quad (5)$$

Напряжения можно представить через полные деформации, используя соотношения (4) и (5):

$$\sigma = -E \cdot \left(z \frac{d^2 w}{dx^2} + \varepsilon_{cr} \right) \quad (6)$$

Интегральная связь изгибающего момента с нормальным напряжением имеет вид:

$$M = - \int_A \sigma \cdot z dA = - \int_A -E \cdot \left(z \frac{d^2x}{dx^2} + \varepsilon_{cr} \right) z dA \quad (7)$$

Раскрыв скобки в подинтегральном выражении (7), запишем:

$$M = E \left(\int_A z^2 dA \cdot \frac{d^2w}{dx^2} + \int_A \varepsilon_{cr} z dA \right) \quad (8)$$

Первый интеграл есть не что иное как осевой момент инерции:

$$I_y = \int_A z^2 dA = b \int_{-h/2}^{+h/2} z^2 dz = \frac{b \cdot h^3}{12}$$

Второй интеграл запишем как:

$$M_{cr} = \int_A \varepsilon_{cr} z dA = Eb \int_{-h/2}^{+h/2} z \cdot \varepsilon_{cr} dz \quad (9)$$

В итоге разрешающее уравнение принимает вид:

$$M = EI \cdot \frac{d^2w}{dx^2} + M_{cr} \quad (10)$$

Подставив в уравнение состояния (1), полные деформации из соотношения (4), получим:

$$n \cdot E \cdot \left(\frac{1}{E} \frac{\partial \sigma}{\partial t} + \frac{\partial \varepsilon_{cr}}{\partial t} \right) + H \cdot \left(\frac{\sigma}{E} + \varepsilon_{cr} \right) = \sigma + n \cdot \frac{\partial \sigma}{\partial t}$$

Или скорость деформации ползучести окончательно:

$$\frac{\partial \varepsilon_{cr}}{\partial t} = \frac{1}{n \cdot E} \left[\sigma \left(1 - \frac{H}{E} \right) - H \cdot \varepsilon_{cr} \right];$$

Для вычисления деформаций ползучести вводится равномерная сетка по времени. Величина ε_{cr} в момент времени $(t + \Delta t)$ вычисляется на основе метода Эйлера [6]:

$$\frac{\partial \varepsilon_{cr}}{\partial t} \approx \frac{\varepsilon_{cr,t+\Delta t} - \varepsilon_{cr,t}}{\Delta t} \quad \Rightarrow \quad \varepsilon_{cr,t+\Delta t} = \varepsilon_{cr,t} + \frac{\partial \varepsilon_{cr}}{\partial t} \Delta t. \quad (11)$$

Аналогичный подход для решения задач ползучести применяется в работах [7–10]. Конечно-разностная аппроксимация уравнения (10) на основе рис. (рис.2.а) примет вид:

$$\frac{w_{i+1} - 2w_i + w_{i-1}}{\Delta x^2} = \frac{1}{EI} (M_i + M_{cr,i}) \quad (12)$$

В качестве граничных условий выступает равенство нулю прогиба на опорах:

$$w_1 = 0; \quad w_{n+1} = 0;$$

Разбив балку на n отрезков сведём задачу к системе линейных алгебраических уравнений, имеющей вид:

$$[A] \cdot \{w\} = \{B\} \quad (13)$$

где $[A]$ – матрица коэффициентов при w_i размерностью $(n + 1; n + 1)$.

$$[A] = \frac{1}{\Delta x^2} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ a_2 & b_2 & c_2 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_3 & b_3 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & a_n & b_n & c_n \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

где

$$a_i = 1; b_i = -2; c_i = 1;$$

$\{w\}$ – вектор неизвестных узловых перемещений; $\{w\} = \{w_1 \ w_2 \ \dots \ w_n\}^T$;

$\{B\}$ – вектор правой части (свободных членов); $\{B\} = \{0 \ f_1 \ f_2 \ \dots \ w_n \ 0\}^T$;

$$f_i = \frac{M_i}{EI} - \frac{M_{cr}}{EI}; M_i = \frac{qx}{2}(l-x), \quad (0 < x < l);$$

Что касается M_{cr} , то определив из (11) значение $\varepsilon_{cr,i}$ для времени $t + \Delta t$, можно вычислить интеграл (9) численно:

$$\int_A \varepsilon_{cr} z dA = \Delta z \left(\frac{\varepsilon_{cr,0}}{2} + \sum_{i=1}^{n-1} \varepsilon_{cr,i} + \frac{\varepsilon_{cr,n}}{2} \right);$$

где

Δz – шаг интегрирования;

$\varepsilon_{cr,0}$ и $\varepsilon_{cr,n}$ – начальное и конечное значения функции;

ε_{cr} ; $\varepsilon_{cr,i}$ – промежуточные значения функции.

Что касается схемы рис.2 б, то здесь граничные условия для такой задачи имеют вид:

$$w_1 = 0; \varphi_1 = \left. \frac{dw}{dx} \right|_1 = 0; \quad w_{n+1} = 0; \varphi_{n+1} = \left. \frac{dw}{dx} \right|_{n+1} = 0;$$

Четыре граничных условия не позволяют использовать дифференциальное уравнение второго порядка (10).

Для удовлетворения всем граничным условиям уравнение (10) нужно дважды продифференцировать по x :

$$\frac{d^4 w}{dx^4} = \frac{1}{EI} \left(-q - \frac{d^2 M_{cr}}{dx^2} \right) \quad (14)$$

В уравнении (14) нагрузка q считается положительной, если она направлена вверх. В рассматриваемом случае нагрузка направлена вниз, поэтому перед первым слагаемым в скобках (14) знак “–”.

Разностная аппроксимация уравнения (14) записывается в виде:

$$\frac{w_{i+2} - 4w_{i+1} + 6w_i + 4w_{i-1} + w_{i-2}}{\Delta x^4} = \frac{-qi}{EI} - \frac{1}{EI} \left(\frac{M_{cr,i+1} - 2M_{cr,i} + M_{cr,i-1}}{\Delta x^2} \right); i = 2, 3, 4, \dots n \quad (15)$$

При составлении уравнения (14) для узлов 2 и n возникает необходимость определения прогибов в так называемых законтурных точках, которые имеют индексы 0 и $n+2$ согласно [10]. Это касается и граничных условий.

Как и для балки с шарнирным обиранием, задача сводится к системе линейных алгебраических уравнений, имеющей вид (13):

где $[A]$ – матрица коэффициентов при w_i размерностью $(n + 1; n + 1)$.

$$[A]^* = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 7 & -4 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -4 & 6 & -4 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -4 & 6 & -4 & 1 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & -4 & 6 & -4 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & -4 & 6 & -4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 1 & -4 & 7 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

где

$$[A] = \frac{1}{\Delta x^4} \cdot [A]^*$$

$\{w\}$ – вектор неизвестных узловых перемещений; $\{w\} = \{w_1 \ w_2 \ \dots \ w_n\}^T$;

$\{B\}$ – вектор правой части (свободных членов); $\{B\} = \{0 \ f_1 \ f_2 \ \dots \ w_n \ 0\}^T$;

$$f_i = -\frac{q_i}{EI} - \frac{1}{EI} \left(\frac{M_{cr,i+1} - 2M_{cr,i} + M_{cr,i-1}}{\Delta x^2} \right); \quad (0 < x < l);$$

Обсуждение результатов. Расчет был выполнен в программном комплексе MATLAB. Из приведенной зависимости (рис.3) видно, что деформации резко возрастают в период времени от 0 до 80 суток, а затем приходят к конечному значению.

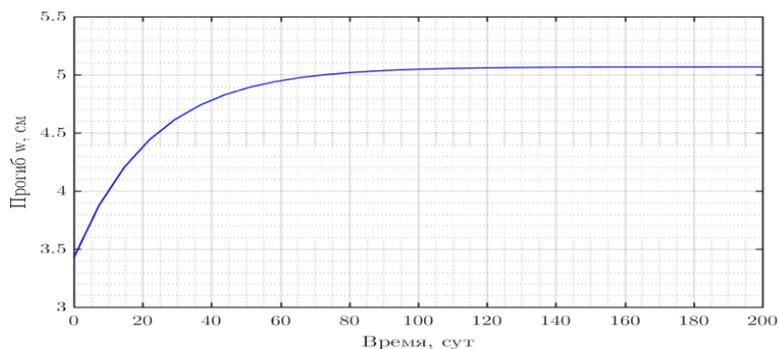


Рис. 3. График роста максимального прогиба во времени. Схема «шарнир-шарнир»
 Fig. 3. Graph of maximum deflection growth over time. “Hinge-hinge” scheme

Для определения максимального прогиба в упругой постановке для шарнирно-опертой балки при действии равномерно-распределенной нагрузки из курса сопротивления материалов:

$$w_{max} = \frac{5}{384} \cdot \frac{q \cdot l^4}{E \cdot I} \quad (16)$$

Авторы работы [1] считают, что для определения прогиба в конце процесса ползучести достаточно заменить мгновенный модуль упругости E на длительный H . С этим утверждением можно согласиться, но оно работает не для всех зависимостей уравнения связи между деформациями и напряжениями.

При подстановке заданных размеров балки получим:

$$w_{max} = \frac{5}{384} \cdot \frac{2 \cdot 6^4}{10^7 \cdot \left(\frac{0,1 \cdot 0,2^3}{12} \right)} = 0,0506 \text{ м.} \quad (17)$$

Графическое значение w_{max} и значение w_{max} , вычисленное по (16) имеют погрешность $\Delta = 1 \cdot 10^{-7}\%$. Полученные графики зависимости максимального прогиба от времени и распределения изгибающего момента во времени приведены на рис. 4 и рис 5, как для условия «Шарнир-Шарнир», так и для «Заделка-Заделка»

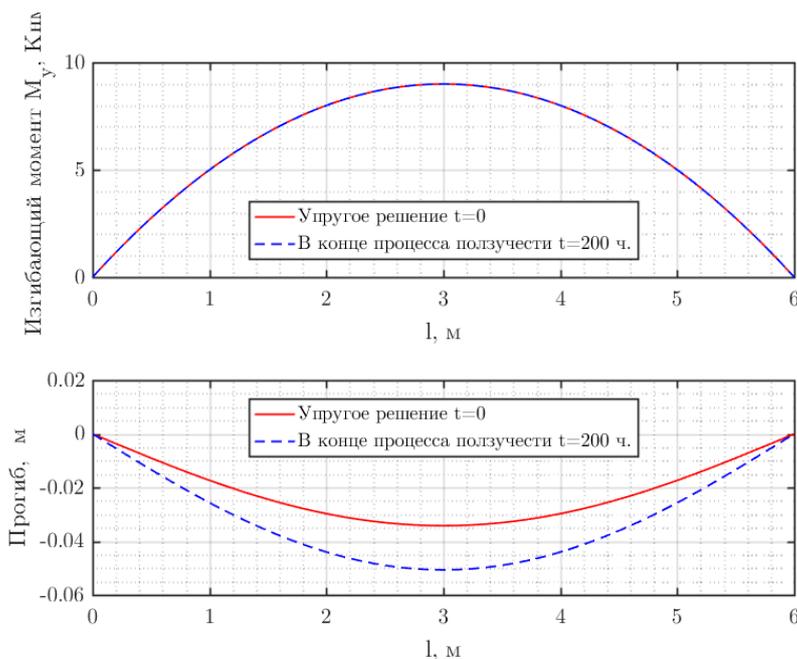


Рис. 4. График изменения изгибающего момента и прогиба по длине балки

1 – распределение изгибающего момента по длине балки в начале и конце процесса ползучести;

2 – распределение прогиба по длине балки в начале и в конце процесса ползучести

Схема – «Шарнир-Шарнир»

Fig. 4. Graph of the change in bending moment and deflection along the length of the beam

1 – distribution of bending moment along the beam length at the beginning and end of the creep process;

2 – distribution of deflection along the beam length at the beginning and end of the creep process

Scheme – “Hinge-Hinge”

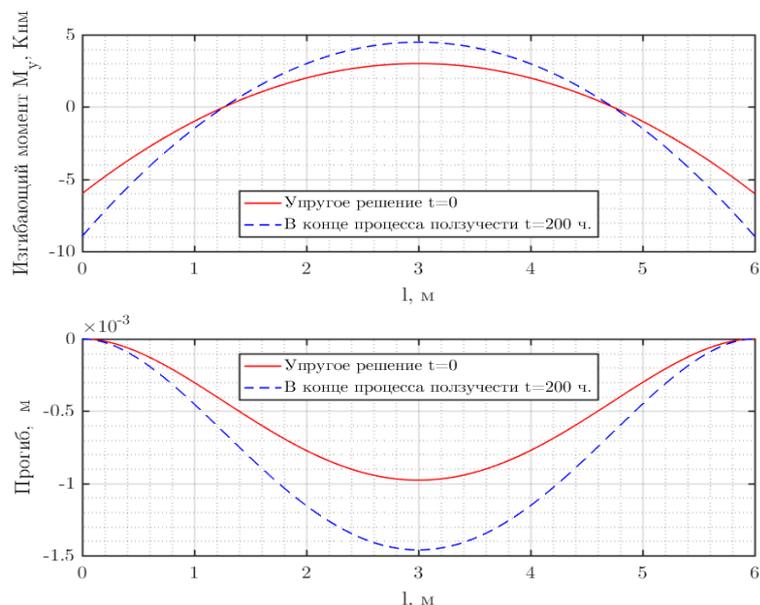


Рис. 5. График изменения изгибающего момента и прогиба по длине балки

1 – распределение изгибающего момента по длине балки в начале и конце процесса ползучести;

2 – распределение прогиба по длине балки в начале и в конце процесса ползучести

Схема – «Заделка-Заделка»

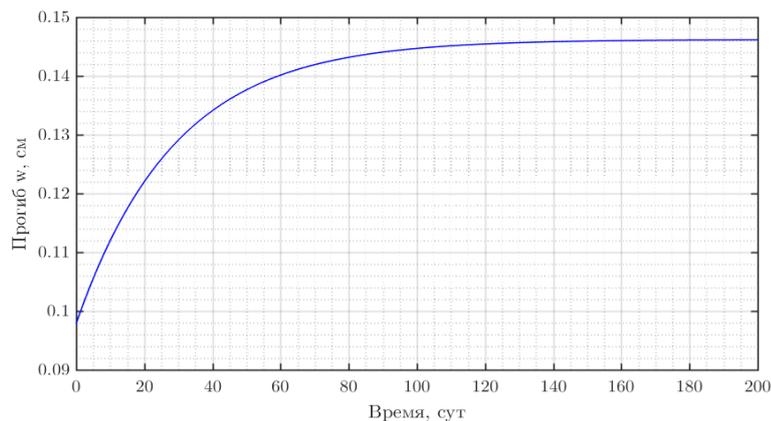
Fig. 5. Graph of the change in bending moment and deflection along the length of the beam

1 – distribution of bending moment along the length of the beam at the beginning and end of the creep process;

2 – distribution of deflection along the length of the beam at the beginning and end of the creep process

Scheme – “Seal-Seal”

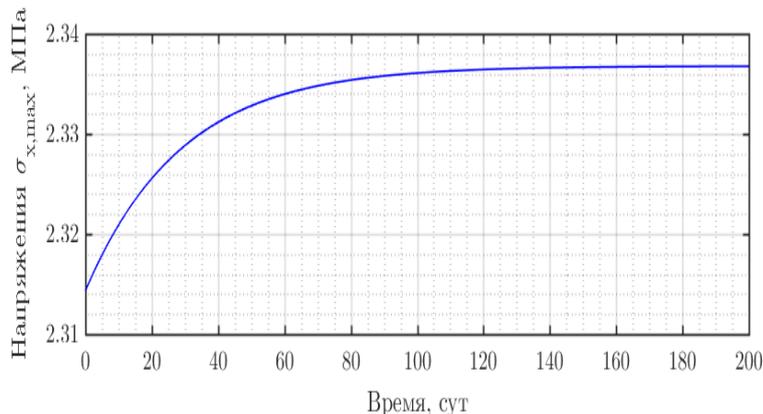
График изменения прогиба во времени представлен графиком рис.6. Здесь отметим, что на постоянное плато прогиб выходит уже только на времени 120 часов.



**Рис. 6. График роста максимального прогиба во времени
 Схема «шарнир-шарнир»**

**Fig. 6. Graph of maximum deflection growth over time
 “Hinge-hinge” scheme**

Отметим также, что при выбранном законе ползучести напряжения во времени не меняются (рис.7).



**Рис. 7. Зависимость нормального напряжения от времени
 Fig. 7. Dependence of the normal stress on time**

Вывод. Если делать заключение по линейной ползучести, то в данной области при $\sigma = const$ можно принять предложенную Ю.М. Ивановым [6] зависимость:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon(t_0) \cdot (1 + bt^{0.21}), \quad \text{где } b = \frac{10^{-2}}{0,735 - 0,02086 \cdot W}; \quad (18)$$

W – влажность древесины, %

Эта зависимость можно принять вместо решения уравнения (1).

Если $\sigma < \sigma_{дл}$ то деформации не превысят величины $\varepsilon_1 = \sigma_{дл}/H$ при сколь угодно большой продолжительности действия нагрузки, то вторая стадия деформирования не наступит вообще.

Библиографический список:

1. Ягнюк Б. Н. Теоретические основы проектирования деревянных конструкций по нормам европейского союза — Еврокоду 5 / Б. Н. Ягнюк. – Москва-Берлин: Директ-Медиа, 2015. – 140с.
2. BS EN 1995-1-1:2004+A2:2014 / Еврокод 5. Проектирование деревянных конструкций.
3. Пятикрестовский К.П., Соколов Б.С. Численные исследования напряженно-деформированного состояния модели шатрового покрытия при длительных ступенчато возрастающих нагрузках. Строительство и реконструкция. Известия, Орел. ГТУ. – 2009. С. 33–38.

4. Пятикрестовский К.П. Нелинейные методы механики в проектировании современных деревянных конструкций: Монография / К.П. Пятикрестовский: М-во образования и науки РФ, МГСУ, 2004. – 320 с.
5. Вареник, К. А. Расчет центрально-сжатый деревянных элементов с учетом ползучести: дис. ... канд. тех. Наук / К. А. Вареник. – Великий Новгород, 2015. – 167 с.
6. Шорстов, Р.А. Совершенствование расчета на устойчивость сжатых деревянных стержней переменного по длине прямоугольного сечения /Р.А. Шорстов, С.Б. Языев, А.С. Чепурненко // Системные технологии. – 2023. – № 1. – С. 140-150.
7. Погорельцев А.А., Пятикрестовский К.П. Вопросы дальнейшего развития конструкций из дерева и пластмасс и совершенствование норм проектирования конструкций из древесины // ПГС. – 2019. – № 2. С.14–18
8. Ржаницын А.Р. Теория ползучести. – М.: Стройиздат, 1968. – 416 с
9. Лапина, А. П. Совершенствование энергетического метода в расчетах балок на устойчивость плоской формы изгиба [Текст] / А. П. Лапина, А. С. Чепурненко, И. М. Зотов, Б. М. Языев // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2019. – № 4 (77). – С. 5-16.
10. Лукаш П.А. Основы нелинейной строительной механики. – М.: Стройиздат, 1978. – 208 с.
11. Иванов Ю.М. Длительная несущая способность деревянных конструкций. – Изв. вузов. Строительство и архитектура. – 1972. – № 11. С. 6–12.
12. Юсупов А.К., Муселемов Х.М., Вишталов Р.И. Оптимизация параметров конструкций путем применения сталей различной прочности. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2024;51(2):232-240.
13. Гатиев М.Ш., Языев Б.М., Иванова Ю.П., Ключев С.В. Ползучесть замкнутого цилиндрического резервуара при гидростатическом давлении. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023;50(4):184-190.
14. Агаханов Э.К., Курачев Р.М., Чепурненко А.С., Языев С.Б. Моделирование изменения деформационных свойств бетона в защитных конструкциях реакторов АЭС под действием ионизирующего излучения. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2016;40(1):8-14.

References:

1. Yagnyuk B. N. Theoretical foundations of design of wooden structures according to the standards of the European Union — Eurocode 5 / B. N. Yagnyuk. - Moscow-Berlin: Direct-Media, 2015;140.
2. BS EN 1995-1-1:2004+A2:2014 / Eurocode 5. Design of wooden structures.
3. Pyatikrestovskiy K. P., Sokolov B. S. Numerical studies of the stress-strain state of the hipped roof model under long-term stepwise increasing loads. Construction and reconstruction. Izvestia, Orel. GTU. 2009; 33-38. (In Russ)
4. Pyatikrestovskiy K. P. Nonlinear methods of mechanics in the design of modern wooden structures: Monograph: Ministry of Education and Science of the Russian Federation, MGSU, 2004;320. (In Russ)
5. Varenik, K. A. Calculation of centrally compressed wooden elements taking into account creep: dis. ... Cand. of Technical Sciences Veliky Novgorod, 2015; 167. (In Russ)
6. Shorstov, R. A. Improving the calculation of the stability of compressed wooden rods of variable length rectangular cross-section / R. A. Shorstov, S. B. Yazyev, A. S. Chepurnenko. *System technologies*. 2023; 1: 140-150. (In Russ)
7. Pogoreltsev A. A., Pyatikrestovsky K. P. Issues of further development of structures made of wood and plastics and improvement of design standards for structures made of wood. *PGS*. 2019; 2:14–18 (In Russ)
8. Rzhantsyn A. R. Creep Theory. M.: Stroyizdat, 1968; 416. (In Russ)
9. Lapina, A. P. Improving the Energy Method in Calculating Beams for Plane Bending Stability [Text] A. P. Lapina, A. S. Chepurnenko, I. M. Zotov, B. M. Yazyev. *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture*. 2019;4 (77): 5–16. (In Russ)
10. Lukash P. A. Fundamentals of Nonlinear Structural Mechanics. M.: Stroyizdat, 1978:208. (In Russ)
11. Ivanov Yu. M. Long-term load-bearing capacity of wooden structures. *News of universities. Construction and architecture*. 1972; 11: 6–12. (In Russ)
12. Yusupov A.K., Muselemov H.M., Vishtalov R.I. Optimization of structural parameters by using steels of different strengths. *Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences*. 2024;51(2): 232–240. (In Russ)
13. Gatiev M.Sh., Yazyev B.M., Ivanova Yu.P., Klyuyev S.V. Creep of a closed cylindrical tank under hydrostatic pressure. *Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences*. 2023;50(4):184–190. (In Russ)
14. Agakhanov E.K., Kurachev R.M., Chepurnenko A.S., Yazyev S.B. Modeling of changes in deformation properties of concrete in protective structures of nuclear power plant reactors under the influence of ionizing radiation. *Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences*. 2016;40(1):8-14. (In Russ)

Сведения об авторах:

Языев Батыр Меретович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Строительная механика и теория сооружений»; ps62@yandex.ru; ORCID 0000-0002-5205-1446

Сун Сюаньчжэнь, аспирант кафедры «Строительная механика и теория сооружений»; suncheng@hit.edu.cn

Магомедов Марсель Айдемирович, соискатель кафедры «Транспортных сооружений и строительных материалов»; marsmag05@ya.ru

Литвинов Степан Викторович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Строительная механика и теория сооружений»; ps62@yandex.ru; ORCID 0000-0001-5729-1425,

Кузнецов Владимир Вячеславович, аспирант кафедры «Строительная механика и теория сооружений»; ibm2225101@gmail.com

Information about authors:

Batyr M. Yazyev, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Prof., Department of Structural Mechanics and Theory of Structures; ps62@yandex.ru ; ORCHID 0000-0002-5205-1446

Xuanzhen Song, Postgraduate student, Department of Structural Mechanics and Theory of Structures; suncheng@hit.edu.cn;

Marcel A. Magomedov, Applicant, Department of Transport Structures and Building Materials; marsmag05@ya.ru

Stepan V. Litvinov, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Assoc. Prof., Department of Structural Mechanics and Theory of Structures; ps62@yandex.ru ; ORCHID 0000-0001-5729-1425,

Vladimir V. Kuznetsov, Postgraduate student, Department of Structural Mechanics and Theory of Structures; ibm2225101@gmail.com

Конфликт интересов/Conflict of interests.

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

Поступила в редакцию/ Received 25.06.2024.

Одобрена после рецензирования / Revised 18.07.2024.

Принята в печать /Accepted for publication 18.07.2024.

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); экспертное заключение о возможности опубликования в открытой печати (1 экз.); метаданные авторов: ФИО, место работы, ученое звание, должность (1 экз.);

Правила оформления текста

Текст подготавливается в текстовом редакторе MicrosoftWord. Статья должна предусматривать разделы: «Введение», «Постановка задачи», «Методы исследования», «Обсуждение результатов», «Вывод». Объем непосредственно содержания статьи должен составлять не менее 9 -10 страниц машинописного текста. Формулы подготавливаются во встроенном редакторе формул MicrosoftWord или в редакторе MathType. Шрифтовое начертание обозначений в формулах, в таблицах и в основном тексте должно быть полностью идентичным. Ссылки на формулы и таблицы даются в круглых скобках, ссылки на использованные источники (литературу) - в квадратных скобках. Формат бумаги А4. Параметры страницы: поля - левое 3 см, верхнее и нижнее 2 см, правое 1,5 см; колонтитулы отсутствуют.

Элементы заглавия публикуемого материала

- УДК
- Перечень авторов (разделяется запятыми, инициалы после фамилий, на русском и английском языке); выравнивание по центру.
- Название статьи (на русском и английском языке).
- Резюме (Abstract) – 200-250 слов, характеризующих содержание статьи (на русском и английском языке).
- Ключевые слова (keywords) 5-10 слов или словосочетаний, отражающих содержание статьи (на русском и английском языке).

Каждый элемент заглавия приводится, начиная с новой строки; выравнивание проводится по центру. **Основной текст** Шрифт TimesNewRoman 12 pt, выравнивание по ширине, первая строка с отступом 1,25 см, межстрочный интервал - 1.

Библиографический список

В статье указывается строка с текстом «**Библиографический список**». Библиографический список на русском языке выполняется по ГОСТ Р 7.0.5 -2008. Библиографический список должен составлять не менее 15 наименований источников литературы, среди которых от 30-70 % ссылок на иностранные источники. Ссылки на неопубликованные работы не допускаются. Обязательно цитирование современных работ, изданных по тематике статьи за последние 5 лет. Доля ссылок на статьи авторов рукописи, изданных ранее, не должна превышать 20% от общего количества ссылок. Библиографический список обязательно должен быть переведен на английский язык. «References» должен быть составлен по стандарту «Ванкувер». Ссылки на материалы, размещенные на электронных носителях, следует допускать в крайнем случае. Редакция оставляет за собой право потребовать от автора замены ссылки, если на момент обработки статьи по указанному адресу материал будет отсутствовать.

Справка об авторах

Включает для каждого автора фамилию, имя, отчество (полностью), ученую или академическую степень, ученое звание, ORCID, название и полный адрес места работы. Обязательно указывается адрес электронной почты. Сведения представляются на русском и английском языках.

Верстка формул

Формулы подготавливаются во встроенном редакторе формул MicrosoftWord или в редакторе MathType; нумеруются только те формулы, на которые есть ссылки в тексте статьи; использование при нумерации букв и других символов не допускается. Выписанные в отдельную строку формулы выравниваются по середине строки, номер заключается в круглые скобки и выравнивается по правому краю текста. Все впервые встречающиеся в формуле обозначения должны быть расшифрованы сразу после формулы.

Верстка рисунков

Рисунки, представляющие собой графики, схемы и т. п., должны быть выполнены в графических векторных редакторах (встроенный редактор MicrosoftWord, CorelDraw, MicrosoftVisio и т. п.). Использование точечных форматов (.bmp, .jpeg, .tif, .html) допустимо только для рисунков, представление которых в векторных форматах невозможно (фотографии, копии экрана монитора и т. п.). Название рисунка указывается на русском и английском языках.

Верстка таблиц

Таблица состоит из следующих элементов: нумерационного заголовка (слова «Таблица» и ее номера арабскими цифрами); шапки (заголовочной части), включающей заголовки граф (объясняют значение данных в графах); боковика (первой слева графы) и прографки. Название таблицы указывается на русском и английском языках.

Требования к рецензированию и хранению рецензий научных статей, поступивших в редакцию журнала

Научная статья, поступившая в редакцию журнала, рассматривается ответственным редактором на соответствие тематике и направлению журнала, правилам оформления и наличие сопроводительных документов. Редакция осуществляет рецензирование всех поступающих в редакцию материалов, с целью их экспертной оценки. Все рецензенты являются признанными специалистами по тематике рецензируемых материалов. Рецензии хранятся в редакции издания в течение 5 лет. При поступлении соответствующего запроса редакция вправе направлять копии рецензий в Министерство науки и высшего образования РФ.

План-график издания журнала

Выпуск 1 (март) – прием статей до 31 декабря предыдущего года; Выпуск 2 (июнь) – прием статей до 31 марта текущего года; Выпуск 3 (сентябрь) – прием статей до 30 июня текущего года; Выпуск 4 (декабрь) – прием статей до 30 сентября текущего года.

Редколлегия оставляет за собой право производить редакционные изменения, не искажающие основное содержание статьи. Статьи, не отвечающие правилам оформления, к рассмотрению не принимаются. Рукописи и электронные носители авторам не возвращаются. Датой поступления считается день получения редколлгией окончательного текста статьи.

Адрес редакционного совета: 367026, РД, г. Махачкала, пр. И. Шамиля, 70, ФГБОУ ВО «ДГТУ», Учебно-лекционный корпус 2, редакция журнала «Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки». Технические вопросы можно выяснить по электронному адресу: 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 Shamilya Ave., Makhachkala 367026, Daghestan, Russia. Daghestan State Technical University, Tutorial-Lecture Building 2, Editorial Board «Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences». Technical questions can be clarified by e-mail: 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– №3 – 2024.

**HERALD
OF DAGHESTAN STATE TECHNICAL UNIVERSITY. TECHNICAL SCIENCES**
Makhachkala, Volume 51, No.3. 2024.

**Верстка: Красикова А.В., Попкова И.А.
Перевод: Эсетова А.М.**

Адрес редакции:
367026, РД, г. Махачкала, пр. И.Шамиля, 70, ФГБОУ ВО «Дагестанский
государственный технический университет»
Тел./факс(8722)623715
(8722)623964
E-mail: vestnik.dgtu@mail.ru Website: <http://vestnik.dgtu.ru>

**Layout: Krasikova A.V., Popkova I.A.
Translation: Esetova A.M.**

Editorial and Publisher address: 70 I. Shamil Ave., Makhachkala 367026, Daghestan, Russia.

**FSBEE HE «DSTU»
Tel./fax (8722)623715
(8722)623964
«БЕСПЛАТНО»**

Подписано в печать 20.09.2024 г. Сдано в печать 25.09.2024 г.
Формат 60x84 ¹/₈. Гарнитура «Times». Бумага офсетная
Тираж 500. Усл. п.л. 27.9. Уч. изд.л. 19.93.
Заказ № 16924

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