

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 49, № 4, 2022.

ВЕСТНИК

**ДАГЕСТАНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА.**

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Volume 49, No.4, 2022.

HERALD

OF DAGHESTAN STATE TECHNICAL UNIVERSITY.

TECHNICAL SCIENCES

Журнал основан в 1997 году.

Выходит 4 раза в год

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

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

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

© Учредитель и издатель ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет», 2022.

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

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

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

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

© Founder and Publisher Daghestan State Technical University, 2022.

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 49, № 4, 2022

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. Картин 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. Кутузов В.М., д.т.н., профессор, президент Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ «ЛЭТИ»), г. Санкт-Петербург, РФ. Магомедов М. Х., д-р.физ.-мат. наук, генеральный директор ООО «САУНО», НПФ, г. Москва, РФ. Сафаралиев Г.К., д.ф.-м.н., член-корр. РАН, научный руководитель НИИ «Микроэлектроники и нанотехнологий» агестанского государственного технического университета, г. Махачкала, РФ. Сулин А.Б., д.т.н., профессор, член-корр. МАХ, НИИ промышленной и морской медицины федерального медико-биологического агентства, г. Санкт-Петербург, РФ. AuthorID (Scopus): 6507491881 Научная рубрика «Информационные технологии и телекоммуникации» Ответственный редактор: Мелехин В.Б., д.т.н., профессор ДГТУ, Махачкала, РФ. Баширов М.М., д.т.н., профессор Азербайджанского государственного технического университета, г. Баку, Азербайджанская республика. Ларионов А.Н., д.э.н., профессор, генеральный директор ООО «Научно-исследовательский центр «Стратегия», г. Москва, РФ. Лобанов И.Е., д.т.н., ведущий научный сотрудник Московского авиационного института (Национальный исследовательский университет), г. Москва, РФ. https://orcid.org/0000-0001-8421-0248 Маркосян М.В., д.т.н., профессор, директор ЗАО «Ереванский НИИ средств связи», г. Ереван, Армения. Мустафаев А.Г., д.т.н., профессор ДГТУ, Махачкала, РФ. Рогозин Е.А., д.т.н., профессор Воронежского института Министерства внутренних дел России, г. Воронеж, РФ. Саркаров Т.Э., д.т.н., профессор, зав. кафедрой Дагестанского государственного технического университета, г. Махачкала, РФ. Финаев В.И., д.т.н., профессор, зав. кафедрой Южного федерального университета, г. Ростов-на-Дону, РФ Хачумов В.М., д.т.н., профессор, заведующий лабораторией Института системного анализа РАН, г. Москва, РФ Шахтарин Б.И., д.т.н., профессор Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, г. Москва, РФ. Якунин А.Г., д.т.н., профессор, зав. кафедрой Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова, г. Барнаул, РФ. Научная рубрика «Строительство и архитектура» Ответственный редактор: Хаджишалапов Г.Н., д.т.н., профессор ДГТУ, Махачкала, РФ. Андреев В.И., д.т.н., профессор, зав. каф. Национального исследовательского Московского государственного строительного университета, г. Москва, РФ. Батдалов М.М., д.т.н., член-корр. Российской академии архитектуры и строительных наук, профессор ДГТУ, Махачкала, РФ. Давидюк А.Н., д.т.н., засл. строитель России, директор НИИЖБ им. А.А.Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», г. Москва, РФ. Казачек В.Г., д.т.н., профессор, главный научный сотрудник Института жилища - НИПТИС им. Атаева С.С., директор ООО «Мобильная диагностика в строительстве», г. Минск, Республика Беларусь. Мажиев Х.Н., д.т.н., профессор Грозненского государственного нефтяного технического университета им. Академика М.Д. Миллионщикова, г. Грозный, РФ. Несветаев Г.В., д.т.н., профессор, зав. каф. Донского государственного технического университета, г. Ростов-на-Дону, РФ. Редакционный совет: Якимович Б.А., д.т.н., профессор, Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашникова, г. Ижевск, РФ. orcid.org/0000-0001-7363-1071 Сопредседатели: Иванов К.М., д.т.н., профессор, ректор БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф.Устинова, г. Санкт-Петербург, РФ. Кутузов В.М., д.т.н., профессор, президент Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ «ЛЭТИ»), г. Санкт-Петербург, РФ. Члены редакционного совета: Бабанлы М.Б.-О., д.т.н., профессор, ректор Азербайджанского государственного университета нефти и промышленности, г. Баку, Азербайджанская республика. Джанзаков И.И., д.т.н., профессор, член-корр. НИА РК, академик МАНЭБ, г. Атырау, Республика Казахстан. Тимошин С.И., д.ф.-м.н., академик Белорусской инженерной академии, профессор, ректор Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого, г. Гомель, Республика Беларусь.	Группы научных специальностей 2.4.8. Машины и аппараты, процессы холодильной и криогенной техники (технические науки) 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации (технические науки) 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки) 2.3.4. Управление в организационных системах (технические науки) 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки) 2.3.6. Методы и системы защиты информации, информационная безопасность (технические науки) 2.1.3. Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение (технические науки), 2.1.5. Строительные материалы и изделия (технические науки), 2.1.9. Строительная механика (технические науки) 2.1.10. Экологическая безопасность строительства и городского хозяйства (технические науки) Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. Том 49, № 4 Махачкала, 2022. – 208с. Издается по решению Ученого Совета ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет» Адрес учредителя и издателя 367026, РД, г. Махачкала, пр. И.Шамиля, 70, ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет». Тел./факс (8722)623715; (8722)623964 e-mail: vestnik.dgtu@mail.ru Website: http://vestnik.dgtu.ru/
--	---

СОДЕРЖАНИЕ

Энергетика и электротехника	6
О.В. Евдулов, М.А. Хазамова, У.И. Абдулхакимов, И.Ю. Гамзалова, И.А. Габитов. Расчет термоэлектрического блока в составе системы для проведения тепловых физиотерапевтических процедур	6
Ю.В. Кудров. Энтропийно-статистический анализ эффективности циклов холодильных агрегатов бытовых холодильников.....	16
Е.Н. Неверов, И.А. Короткий, П.С. Коротких, М.Ю. Мокрушин, А.Н. Порохнов. Технические решения по вторичному использованию тепловой энергии и повышению экологической эффективности инженерных систем	26
Ш.А. Юсуфов, Т.Э. Саркаров, Д.А. Магомедов, Д.В. Евдулов, П.Н. Суракатова. Моделирование температурного поля при тепловом воздействии на передний отрезок глазного яблока человека	35
Информационные технологии и телекоммуникации.....	45
О.И. Бокова, Н.С. Хохлов, А.О. Бокова. Развертывание отказоустойчивого сервера видеоконференцсвязи для судебной системы на основе виртуализации.....	45
А.О. Ефимов, И.Г. Дровникова, Е.А. Rogozin, В.Р. Романова, Е.В. Филь. Расчет коэффициента уровня защищенности автоматизированной системы органов внутренних дел на основе информационной обеспеченности СЗИ обновлениями сигнатур вирусов и угроз	52
М.Р. Магомедова, Р.А. Курбанов. Моделирование общего размыва неоднородных по крупности несвязных грунтов в руслах рек	58
В.И. Петренко, Ф.Б. Тебуева, В.О. Антонов, С.С. Рябцев, А.С. Павлов. Метод декомпозиции глобальной задачи на локальные задачи посредством процесса коллективного принятия решений в роевых робототехнических системах	67
А.Д. Попов, А.Д. Попова. Анализ технологий защиты информации для использования в инфраструктуре предприятия.....	78
В.А. Репенко, С.А.Резниченко. Защита от атак с применением средств и методов социальной инженерии.....	85
Е.А. Rogozin, И.Г. Дровникова, А.О. Ефимов, В.Р. Романова. К вопросу анализа нормативно-правовых документов по информационной безопасности автоматизированных систем органов внутренних дел Российской Федерации для оценки уровня их защищенности.....	97
П.А. Сеченов, И.А. Рыбенко. Численный метод и математическая модель нахождения равновесного состава термодинамической системы программного комплекса T-Energy	104
Ф.Б. Тебуева, М.Г. Огур, И.В. Мандрица, А.Б. Чернышев, Г.И. Линец, В.П. Мочалов. Метод стеганодетектирования скрытых изображений для систем защиты объектов интеллектуальной собственности	113
Т.А. Юрошева, А.В. Калинин, В.Г. Макиев. Алгоритм проектирования несущих конструкций многоэтажного здания с использованием среды визуального программирования DYNAMO STUDIO	126
Э.И. Янгиров, А.И. Мифтахова, Е.И. Карасева, А.И. Янгиров, Е.Ю. Никулина. Обзор и группировка оценочных критериев эффективности мобильных приложений	134
Строительство и архитектура	142
А.И. Булгаков, М.Х. Калиева, М.О. Конусов. Напряженно-деформированное состояние металлодеревянного ригеля двухшарнирных рам.....	142
А.Ю. Ким, С.В. Полников, М.Ф. Амоян. Особенности учета геометрической и физической нелинейностей в большепролетных мембранно-пневматических системах	152
А.С. Личковаха, Б.А. Шемшура, С.А. Кузнецов. Исследование зависимости максимальных нормальных напряжений в сечениях тонкостенных стержней от кривизны изогнутой оси при продольном изгибе	161
Д.А. Тарасов. Применение условной оптимизации для определения допустимых нагрузок на изгибно-жесткие нити	169
В.Н. Федосеев, С.А. Логинова. Математическое моделирование процессов испарения в контуре теплового насоса	176
К.Н. Хашхожев, Л.И. Лесняк, Р.М. Курачев, А.С. Чепурненко. Определение несущей способности внецентренно сжатых трубобетонных колонн на основе деформационной теории пластичности бетона	182
А.К. Юсупов, Х.М. Муселемов, Р.И. Вишталов. Особенности работы плоских большепролетных конструкций	194
Требования к оформлению статей	204

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 4 9 , N o . 4 , 2 0 2 2 .	
Editor-in-Chief: Rasul M. Aliev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; https://orcid.org/0000-0002-3061-4121 Deputy Editor: Aida M. Esetova, Dr. Sci. (Econom.), Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; https://orcid.org/0000-0003-1093-5507 Editorial Board: Scientific rubric «Energy and Electrical Engineering» Executive editor: Oleg V. Evdulov, Dr. Sci. (Eng.), Assoc. Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; Ganapi J. Akhmedov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; Alexander P. Ivanov, Dr. Sci. (Mathematics and Physics), Moscow Institute of Physics and Technology (State University), Dolgoprudny, Russia; Nicholay I. Kargin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Vice Rector, Deputy Director of the Institute for Functional Nuclear Electronics, National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia; Dmitry N. Kobzareno, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences Institute of Geothermal Problems, Daghestan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Makhachkala, Russia; Alexander A. 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; Scientific rubric «Information Technology and Telecommunications» Executive editor: Vladimir B. Melekhin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; Mahir M. Bashirov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Azerbaijan Technical University, Baku, Azerbaijan; Arkady N. Larionov, Dr. Sci. (Economics), Professor, General Director LLC Research Center «Strategy», Moscow, Russia Igor E. Lobanov, Dr. Sci. (Eng.), Leading Researcher, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia; Mher V. Markosyan, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Director of Yerevan Research Institute of Communication Facilities, Yerevan, Republic of Armenia; Aslan G. Mustafayev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; Eugene A. Rogozin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Voronezh Institute of the Ministry of the Interior of Russia, Voronezh, Russia; Tazhudin E. Sarkarov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; Boris I. Shakhtarin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia Valery I. Finayev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department, Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia; Vyacheslav M. Khachumov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of laboratory, Institute for Systems Analysis of RAS, Moscow, Russia; Alexey G. Yakunin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department, Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia. Scientific rubric «Building and architecture» Executive editor: Gadzhimurad N. Khadzishalapov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; Vladimir I. Andreev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russia; Muhtaritdin M. Batdalov, Dr. Sci. (Eng.), Corresponding member of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia; Alexey N. Davidyuk, Dr. Sci. (Eng.), Honored Builder of Russia, Director, Gvozdev NIIZHB, JSC «SIC Construction», Moscow, Russia; Vladimir G. Kazachek, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Senior researcher, Ataev Institute of Dwelling - NIPTIS Director of Mobile diagnostics in construction, Minsk, Republic of Belarus; Khasan N. Mazhiev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Millionshchikov Grozny State Oil Technical University, Grozny, Russia; Gregory V. Nesvetaev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of Construction Technologies Department, Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia; Editorial council Chairman of the editorial council: Boris A. Yakimovich, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia. The co-chairs of the editorial council: Konstantin M. Ivanov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Rector, Ustinov Baltic State Technical University «VOENMECH», Saint-Petersburg, Russia; Vladimir M. Kutuzov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, President St. Petersburg Electrotechnical University «LETI», Saint-Petersburg, Russia; Members of the Editorial Board: Mustafa B.-O. Babanly, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Rector, Azerbaijan State University of Oil and Industry, Baku, Azerbaijan; Islam I. Djanzakov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Corresponding member, SRA RK, Academician of MANEB, Atyrau, Republic of Kazakhstan; Sergey I. Timoshin, Dr. Sci. (Mathematics and Physics), Academician of the Belarusian Academy of Engineering, Professor, Rector, Sukhoi Gomel State Technical University, Gomel, Republic of Belarus;	Research areas 2.4.8. Machines and devices, processes of refrigeration and cryogenic equipment (Technical Sciences), 2.3.1. System analysis, management and information processing (Technical Sciences), 2.3.3. Automation and management of technological processes and production (Technical Sciences), 2.3.4. Management in organizational systems (Technical Sciences), 1.2.2. Mathematical modeling, numerical methods and program complexes (Technical Sciences), 2.3.6. Methods and systems for information security, information security (Technical Sciences), 2.1.3. Heat supply, ventilation, air conditioning, gas supply and lighting (Technical Sciences), 2.1.5. Building materials and products (Technical Sciences), 2.1.9. Construction mechanics (Technical Sciences), 2.1.10. Ecological safety of construction and urban economy (Technical Sciences), Herald of Daghestan State Technical University. Technical Science. Vol. 49, No.4 Makhachkala, 2022–208p. Published by Decision of the Academic Council Daghestan State Technical University Edition and Publisher Address: 70 I. Shamil Ave., Makhachkala, the Republic of Daghestan 367026, Russia. Daghestan State Technical University Tel./fax (8722)623715 (8722)623964

CONTENTS

Energy and Electrical Engineering..... 6

- O.V. Evdulov, M.A. Khazamova, U.I. Abdulkhakimov, I.Yu. Gamzalov, I.A. Gabitov. Calculation of a thermoelectric unit as part of a system for conducting thermal physiotherapy procedures..... 6
- Yu. V. Kudrov. Entropy-statistical analysis of the efficiency of cycles of refrigeration units of household refrigerators 16
- E.N. Neverov, I.A. Korotkiy, P.S. Korotkiy, M.Y. Mokrushin, A.N. Porokhnov. Technical solutions for the recycling of thermal energy and improving the environmental efficiency of engineering systems..... 26
- Sh.A. Yusufov, T.E. Sarkarov, D.A. Magomedov, D.V. Evdulov, P.N. Surakatova. Modeling of the temperature field under thermal action on the anterior segment of the human eyeball..... 35

Information Technology and Telecommunications 45

- O.I. Bokova, N.S. Khokhlov, A.O. Bokova. Deployment of a fault-tolerant videoconferencing server for a virtualization-based judicial system..... 45
- A.O. Efimov, I.G. Drovnikova, E.A. Rogozin, V.R. Romanova, E.V. Phil. Calculation of the security level coefficient of the automated system of the internal affairs bodies based on the information security of the information security system with updates of virus and threat signatures. 52
- M.R. Magomedova, R.A. Kurbanov. Modeling of general erosion of heterogeneous non-cohesive soils in river beds... . 58
- V.O. Petrenko, F.B. Tebueva, V.O. Antonov, S.S. Ryabtsev, A.S. Pavlov. Method for decomposition a global task into local tasks through the process of collective decision making in swarm robotic systems..... 67
- A.D. Popov, A.D. Popova. Analysis of information security technologies for use in the enterprise infrastructure..... 78
- V.A. Repenko, S.A. Reznichenko. Protection against attacks using social engineering tools and methods 85
- E.A. Rogozin, I.G. Drovnikova, A.O. Efimov, V.R. Romanova. On the issue of analysis of legal documents on information security of automated systems of internal affairs bodies of the Russian Federation to assess the level of their security.. 97
- P.A. Sechenov, I.A. Rybenko. Numerical method and mathematical model for finding the equilibrium composition of the thermodynamic system of the T-Energy software package.....104
- F.B. Tebueva, M.G. Ogur, I.V. Mandritsa, A.B. Chernyshev, G.I. Linets, V.P. Mochalov. Stegan detection method for latent images for intellectual property protection systems113
- T.A. Yurosheva, A.V. Kalinichenko, V.G. Makiev. Algorithm for designing load-bearing structures of a multi-storey building using the visual programming environment DYNAMO STUDIO126
- E.I. Yangirov, A.I. Miftakhova, E.I. Karaseva, A.I. Yangirov, E.Yu. Nikulina. Overview and grouping of evaluation criteria for the effectiveness of mobile applications134

Building and Architecture 142

- A.I. Bulgakov, M.H. Kalieva, M.O. Konusov. Stress-strain state of metal-wood crossbar of double-hinged frames.142
- A.Yu. Kim, S.V. Polnikov, M.F. Amoyan. Features of Accounting for Geometric and Physical Nonlinearities in Long-Span Pneumatic Membrane Systems152
- A.S. Lichkovakha, B.A. Shemshura, S.A. Kuznetsov. Study of the dependence of the maximum normal stresses in the sections of thin-walled rods on the curvature of the bent axis in the longitudinal bending.....162
- D.A. Tarasov. Applying conditional optimization to determine the allowable loads on flexurally rigid threads169
- V.N. Fedoseev, S.A. Loginova. Mathematical modeling of evaporation processes in a heat pump circuit.....177
- K.N. Khashkhozhev, L.I. Lesnyak, R.M. Kurachev, A.S. Chepurnenko. Determination of the bearing capacity of encentrally compressed concrete filled steel tubular columns on the basis of the deformation theory of concrete plasticity182
- A.K. Yusupov, Kh.M. Muselemov, R.I. Vishtalov. Features of the work of flat large-span structures.....194

Formatting requirements for papers204

ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА
ENERGY AND ELECTRICAL ENGINEERING

УДК 621.315.592

DOI: 10.21822/2073-6185-2022-49-4-6-15

Оригинальная статья /Original Paper

**Расчет термоэлектрического блока в составе системы для проведения
тепловых физиотерапевтических процедур**

О.В. Евдулов, М.А. Хазамова, У.И. Абдулхакимов, И.Ю. Гамзалова, И.А. Габитов

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

Резюме. Цель. Целью исследования является рассмотрение методики расчета термоэлектрического блока в составе термоэлектрической системы (ТЭС), предназначенной для теплового воздействия в медицинской практике, а также результатов осуществленного по ней численного эксперимента. **Метод.** Описана расчетная модель термоэлектрического блока, входящего в состав системы для проведения тепловых физиотерапевтических процедур. Модель построена на основе стандартных выражений для расчета электрических и геометрических параметров термоэлектрических модулей (ТЭМ) в зависимости от тепло- и электрофизических параметров материалов термоэлементов (ТЭ), величин тепло- и холодопроизводительности, характеристик систем отвода теплоты от горячих спаев ТЭ. **Результат.** По расчетной модели произведен расчет термоэлектрического блока, входящего в состав системы для проведения тепловых косметологических процедур, разработанной в лаборатории полупроводниковых термоэлектрических приборов и устройств Дагестанского государственного технического университета. Получены графики зависимости изменения холодопроизводительности ТЭМ, холодильного коэффициента, напряжения питания от перепада температур между спаями для различных значений тока питания, а также зависимость напряжения на ТЭМ от величины тока питания при различных значениях перепада температур между спаями, изменение температуры на холодном спае и мощности ТЭМ от тока питания. Графики рассчитаны при температуре горячего спая 320 К. **Вывод.** Установлено, что рабочий диапазон мощностей ТЭМ типа ТВ-127-1,4-2,5 находится в пределах от 8 до 17 Вт при среднем перепада температур между спаями 45 К. При этом ток питания будет составлять 1,5-3,5 А при потребляемой мощности от 20 до 80 Вт. Холодильный коэффициент изменяется в пределах от 0,1 до 0,5. В соответствии с решаемыми задачами в термоэлектрический блок прибора должно входить четыре ТЭМ данного типа.

Ключевые слова: термоэлектрический блок, термоэлектрический модуль, тепловое воздействие, физиотерапия, расчет, численный эксперимент, температура

Для цитирования: О.В. Евдулов, М.А. Хазамова, У.И. Абдулхакимов, И.Ю. Гамзалова, И.А. Габитов. Расчет термоэлектрического блока в составе системы для проведения тепловых физиотерапевтических процедур. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022;49(4):6-15. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-4-6-15

**Calculation of a thermoelectric unit as part of a system for conducting thermal
physiotherapy procedures**

O.V. Evdulov, M.A. Khazamova, U.I. Abdulkhakimov, I.Yu. Gamzalova, I.A. Gabitov

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

Abstract. Objective. The aim of the study is to consider the methodology for calculating a thermoelectric unit as part of a thermoelectric system (TPS) intended for thermal exposure in medical practice, as well as the results of a numerical experiment carried out using it. **Method.** The calculation model of the thermoelectric block, which is part of the system for conducting thermal physiotherapy procedures, is described. The model is built on the basis of standard expressions for calculating the

electrical and geometric parameters of thermoelectric modules (TEM) depending on the thermal and electrical parameters of thermoelement (FC) materials, heat and cooling capacity values, and characteristics of heat removal systems from FC hot junctions. **Result.** According to the calculation model, the thermoelectric unit was calculated, which is part of the system for conducting thermal cosmetic procedures, developed in the laboratory of semiconductor thermoelectric devices and devices of the Daghestan State Technical University on the temperature difference between the junctions for different values of the supply current, as well as the dependence of the voltage on the TEM on the magnitude of the supply current at different values of the temperature difference between the junctions, the change in temperature at the cold junction and the power of the TEM on the supply current. The graphs are calculated at a hot junction temperature of 320 K. **Conclusion.** As a result of calculations, it was found that the operating power range of TEMs of the TV-127-1.4-2.5 type is in the range from 8 to 17 W with an average temperature difference between the junctions of 45 K. In this case, the supply current will be 1.5-3.5 A with a power consumption of 20 to 80 watts. The refrigerating coefficient varies from 0.1 to 0.5. In accordance with the tasks to be solved, the thermoelectric unit of the device should include four TEMs of this type.

Key words: thermoelectric unit, thermoelectric module, thermal effect, physiotherapy, calculation, numerical experiment, temperature

For citation: O.V. Evdulov, M.A. Khazamova, U.I. Abdulkhakimov, I.Yu. Gamzalov, I.A. Gabitov. Calculation of a thermoelectric unit as part of a system for conducting thermal physiotherapy procedures. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science. 2022;49(4):6-15. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-4-6-15

Введение. В настоящее время в медицинской практике все большее распространение получают тепловые физиотерапевтические процедуры [1-5], действие которых связано с расширением кровеносных и лимфатических сосудов, что улучшает кровообращение в органах и тканях, стимулирует окисление жира, очищение организма от токсинов, улучшает энергетический баланс.

Тепловое воздействие применяется для лечения заболеваний мышц и суставов, желудочно-кишечного тракта, почечнокаменной болезни, неврозов, артрозов и артритов, фарингитов и тонзиллитов, синдрома хронической усталости; в онкологии; для посттравматического восстановления и т. д. [6, 7]. Так, для проведения физиотерапевтических процедур, связанных с нагревом и охлаждением отдельных зон человеческого организма применяются нагретые (охлажденные) компрессы, примочки и припарки из лечебных грязей, парафина, озокерита, нафталана, глины, песка, термопакеты, лучистая энергия, жидкой азот, парокомпрессионные и абсорбционные машины, термоэлектрические устройства [8-12].

Использование перечисленных методов развивается по двум основным направлениям. Во-первых, охлаждение либо нагрев сравнительно больших по площади областей тела человека. Во-вторых, воздействие на участки, имеющие существенно меньшие площади, характеризующиеся, в том числе, патологическими изменениями.

При этом если в первом случае для охлаждения (нагрева) больших по размерам зон организма используются мощные холодильные и тепловые машины, работающие на основе цикла Карно, то для локального теплового воздействия на отдельные небольшие области могут быть применены системы с меньшей холодо- и теплопроизводительностью, использующие другие принципы преобразования энергии.

В этих условиях для реализации теплового воздействия на незначительные площади организма человека в лечебных целях перспективным является применение специальных ТЭС [13-17], отличающихся высокой надежностью, функциональностью, экологичностью, бесшумностью и значительным ресурсом, а также возможностью простого перехода от режима охлаждения к режиму нагрева и наоборот, т. е. универсальностью.

Постановка задачи. Основным исполнительным элементом в ТЭС (источником тепло-

ты) является блок термоэлектрических модулей (ТЭМ). От его энергетических возможностей и эффективности работы напрямую зависит качество проведения тепловых физиотерапевтических процедур [18].

Поэтому представляет интерес разработка методик подбора и расчета ТЭМ для соответствующих систем, позволяющих оптимизировать его параметры (энергетические, массогабаритные, динамические) в зависимости от решения требуемых задач, связанных с тепловым воздействием на отдельные области человеческого организма.

Целью исследования является рассмотрение методики расчета термоэлектрического блока в составе ТЭС, предназначенной для теплового воздействия в медицинской практике, а также результатов осуществленного по ней численного эксперимента.

Методы исследования. Как правило в качестве исходных данных для расчета ТЭМ в составе ТЭС выступают величины их холодо- и теплопроизводительности, определенные на первом этапе задачи моделирования системы для теплового воздействия исходя из конкретно решаемых медицинских задач.

К исходным параметрам также относятся тепло- и электрофизические характеристики применяемых в ТЭМ материалов. Искомые величинами в данном случае являются геометрические размеры термоэлементов (ТЭ), входящих в состав ТЭМ, значения питающего электрического тока и напряжения, потребляемая электрическая энергия, величина холодильного и отопительного коэффициента.

Так как коэффициент полезного действия ТЭ относительно невысок, важным является использование таких режимов работы ТЭМ, при которых возможна наибольшая экономия энергии (данное обстоятельство актуальнее всего при работе ТЭС в качестве охладителя).

К таким режимам относится режим максимального холодильного коэффициента, поэтому нижеприведенная методика расчета ТЭМ рассмотрена именно для этого случая.

Последовательность вычислений следующая. Пусть имеется ТЭМ, состоящий из m ТЭ. Тогда его мощность, приходящаяся на холодные спаи, будет определяться из соотношения:

$$Q_{ТЭМ} = mGT_{ТЭМх} \frac{s}{\ell} \frac{t-1}{t+1} (M-t), \quad (1)$$

где $M = \sqrt{1 + 0,5Z(T_{ТЭМх} + T_{ТЭМг})}$, $T_{ТЭМх}$ – температура холодного спая ТЭ, $T_{ТЭМг}$ –

температура горячего спая ТЭ, $t = \frac{T_{ТЭМг}}{T_{ТЭМх}}$, $Z = \frac{e^2}{(\sqrt{\lambda_p \rho_p} + \sqrt{\lambda_n \rho_n})^2}$ – добротность ТЭ, e –

коэффициент термо-э.д.с. ТЭ, $G = \frac{2M}{M-1} \frac{\sqrt{\lambda_p \rho_p} + \sqrt{\lambda_n \rho_n}}{\sqrt{\lambda_p \rho_n} + \sqrt{\lambda_n \rho_p}} \sqrt{\lambda_n \lambda_p}$, $\lambda_p, \rho_p, \lambda_n, \rho_n$ – удельные теп-

лопроводности и сопротивления ветвей ТЭ р- и n-типа соответственно, s, ℓ – площадь поперечного сечения и длина ветвей ТЭ.

Аналогичным образом определяется мощность ТЭМ, приходящаяся на его горячие спаи:

$$Q_{ТЭМг} = mGT_{ТЭМх} \frac{s}{\ell} \frac{t-1}{t+1} (tM-1). \quad (2)$$

Величина электрического тока, питающего ТЭМ, рассчитывается по формуле:

$$I_{ТЭМ} = \frac{(M^2 - 1)Q_{ТЭМ}}{eM(MT_{ТЭМг} - T_{ТЭМх})}. \quad (3)$$

Геометрические размеры ТЭ, входящих в состав ТЭМ (высота и площадь поперечного се-

чения) рассчитываются из ранее заданного отношения $\frac{s}{\ell}$, а также по известной величине питающего электрического тока:

$$\frac{\ell}{s} = \frac{e(T_{ТЭМ_T} - T_{ТЭМ_X})\sigma_p}{I_{ТЭМ}(M-1)\left(1 + \frac{\sigma_p s_p}{\sigma_n s_n}\right)}, \quad (4)$$

$$\frac{\ell/s_p}{\ell/s_n} = \sqrt{\frac{\lambda_p \sigma_p}{\lambda_n \sigma_n}}, \quad (5)$$

где σ_p, σ_n – удельные электрические проводимости ветвей ТЭ р-типа и n-типа соответственно.

Потребляемая электроэнергия определяется из соотношения

$$W_{ТЭМ} = I_{ТЭМ}^2 R_{ТЭМ}, \quad (6)$$

где $R_{ТЭМ} = n(\rho_n \frac{\ell}{s_n} + \rho_p \frac{\ell}{s_p})$ – электрическое сопротивление ТЭМ.

Важной составляющей частью расчета ТЭМ является определение характеристик системы теплоотвода.

Применительно к ТЭС рассматриваемого типа такая система может быть реализована на основе воздушного и жидкостного метода отвода теплоты.

В общем случае, как для воздушной, так и жидкостной системы теплоотвода отводимая мощность для обеспечения требуемой температуры горячих спаев ТЭ определяется из выражения [19]:

$$Q_{ТЭМ_T} = \alpha_{cp}(T_{ТЭМ_T} - T_{cp})\psi, \quad (7)$$

где α_{cp} – коэффициент теплопередачи от горячих спаев ТЭ к теплоотводящей среде, ψ – коэффициент эффективности оребрения поверхности (для гладкой теплоотдающей поверхности $\psi = 1$), T_{cp} – температура теплоотводящей среды.

Основной задачей в данном случае является определение значения α_{cp} , которое в общем случае определяется из выражения:

$$\alpha_{cp,k} = \frac{Nu\lambda_{cp}}{\ell_0}, \quad (8)$$

где Nu – число Нуссельта; λ_{cp} – коэффициент теплопроводности теплоотводящей среды; ℓ_0 – определяющий размер.

Выражения для определения числа Нуссельта в зависимости от вида системы теплоотвода имеют следующий вид [20]:

1. Воздушный теплоотвод, плоская не оребренная поверхность

$$Nu = \begin{cases} 0,58 Re^{0,5} & \text{при } Re > 4 \cdot 10^4 \\ 0,032 Re^{0,8} & \text{при } Re \geq 10^4 \end{cases}, \quad (9)$$

2. Воздушный теплоотвод, ребристая поверхность

$$Nu = \begin{cases} 1,4 \left[\sqrt{1 + 0,443 \frac{Grb_{p.to}}{2D_{p.to}}} - \left(1 + 0,113 \frac{Grb_{p.to}}{2D_{p.to}} \right) \right] \text{ при } \frac{Grb_{p.to}}{2D_{p.to}} < 7 \\ 0,64 + 0,023 \frac{Grb_{p.to}}{2D_{p.to}} \text{ при } 7 \leq \frac{Grb_{p.to}}{2D_{p.to}} < 20 \\ 0,5 \frac{Grb_{p.to}}{2D_{p.to}} \text{ при } \frac{Grb_{p.to}}{2D_{p.to}} \geq 20 \end{cases}, \quad (10)$$

3. Воздушный теплоотвод, штыревая радиаторная система

$$Nu = 0,21 Re^{0,65}, \quad (11)$$

где Re – число Рейнольдса, $D_{p.to}$ – длина ребра; $b_{p.to}$ – расстояние между ребрами; Gr – число Грасгофа; Pr – число Прандтля,

4. Жидкостной теплоотвод, вязкостный режим в транспортной зоне

$$Nu = 1,55 \left(\frac{1}{Pe} \frac{\ell}{d} \right)^{-\frac{1}{3}} \left(\frac{\mu_c}{\mu_{ж}} \right)^{-0,14} \phi_{\ell}, \quad (12)$$

где ϕ_{ℓ} – поправка на гидродинамический начальный участок,

$$\phi_{\ell} = 0,6 \left(\frac{1}{Re} \frac{\ell}{d} \right)^{-\frac{1}{7}} \left(1 + 2,5 \frac{1}{Re} \frac{\ell}{d} \right), \text{ } Pe \text{ – число Пекле,}$$

5. Жидкостной теплоотвод, вязкостно-гравитационный режим в транспортной зоне

$$Nu = 0,35 \left(Pe \frac{\ell}{d} \right)^{0,3} \left(Gr Pr \frac{\ell}{d} \right)^{0,18}, \quad (13)$$

6. Жидкостной теплоотвод, турбулентный режим в транспортной зоне

$$Nu = 0,023 Re_{ж}^{0,8} Pr_{ж}^{0,43} \left(\frac{Pr_{ж}}{Pr_c} \right)^{0,25}. \quad (14)$$

По соотношениям (1)-(14) может быть произведен расчет ТЭМ с определением его основных параметров. Численный эксперимент осуществлен для термоэлектрического блока, входящего в состав системы для проведения тепловых косметологических процедур, разработанной в лаборатории полупроводниковых термоэлектрических приборов и устройств ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет» [21].

Обсуждение результатов. Произведен расчет параметров стандартного ТЭМ типа ТВ-127-1,4-2,5 (производитель ООО «Криотерм», г. Санкт-Петербург).

На рис.1-6 представлены полученные зависимости изменения холодопроизводительности ТЭМ $Q_{ТЭМ}$, холодильного коэффициента η , напряжения питания $U_{ТЭМ}$ от перепада температур между спаями для различных значений тока питания $I_{ТЭМ}$, а также зависимость напряжения на ТЭМ от величины тока питания при различных значениях перепада температур между спаями $\Delta T_{ТЭМ}$, изменение температуры на холодном спае $T_{ТЭМх}$ и мощности ТЭМ от тока питания. Графики рассчитаны при температуре горячего спая 320 К. Стабилизация температуры горячих спаев ТЭМ осуществляется посредством жидкостной теплоотводящей системы. В соответствии с представленными расчетными данными установлено, что рабочий диапазон мощностей ТЭМ типа ТВ-127-1,4-2,5 находится в пределах от 8 до 17 Вт при среднем перепаде температур между спаями 45 К.

При этом ток питания будет составлять 1,5-3,5 А при потребляемой мощности от 20 до 80 Вт. Холодильный коэффициент изменяется в пределах от 0,1 до 0,5. В соответствии с решаемыми задачами в термоэлектрический блок прибора должно входить четыре ТЭМ данного типа.

$Q_{ТЭМ}$, Вт

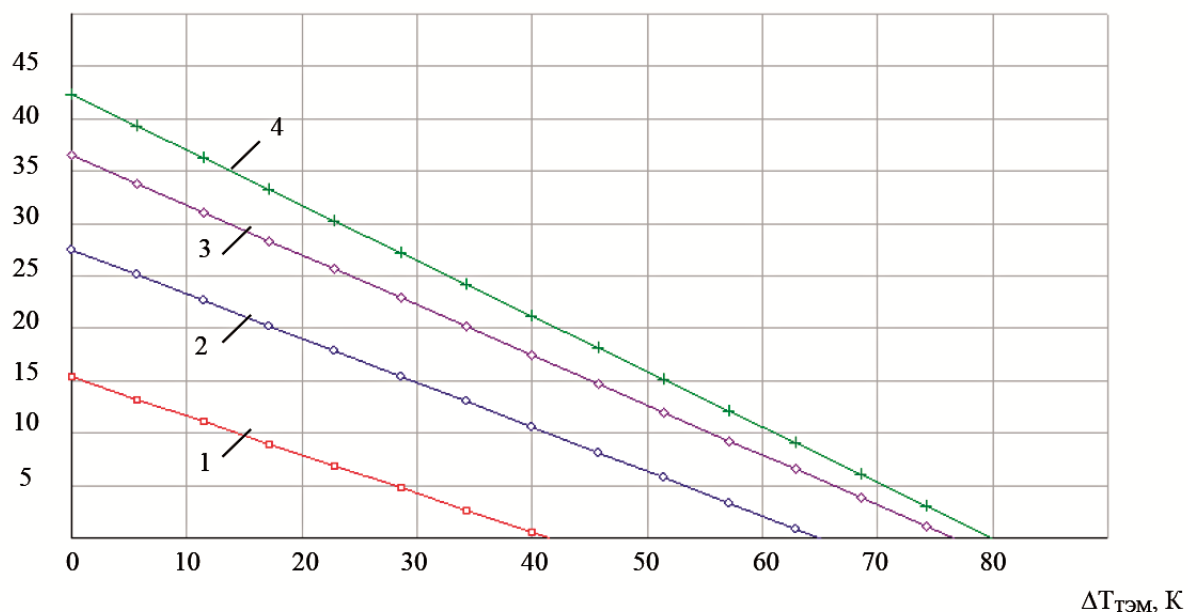


Рис.1. Зависимость мощности ТЭМ от перепада температур между спаями при различных значениях тока питания 1- $I_{ТЭМ}=1$ А, 2- $I_{ТЭМ}=2$ А, 3 - $I_{ТЭМ}=2,9$ А, 4 - $I_{ТЭМ}=3,9$ А

Fig.1. Dependence of the TEM power on the temperature difference between the junctions at different values of the supply current 1- $I_{ТЭМ}=1$ А, 2- $I_{ТЭМ}=2$ А, 3 - $I_{ТЭМ}=2,9$ А, 4 - $I_{ТЭМ}=3,9$ А

η

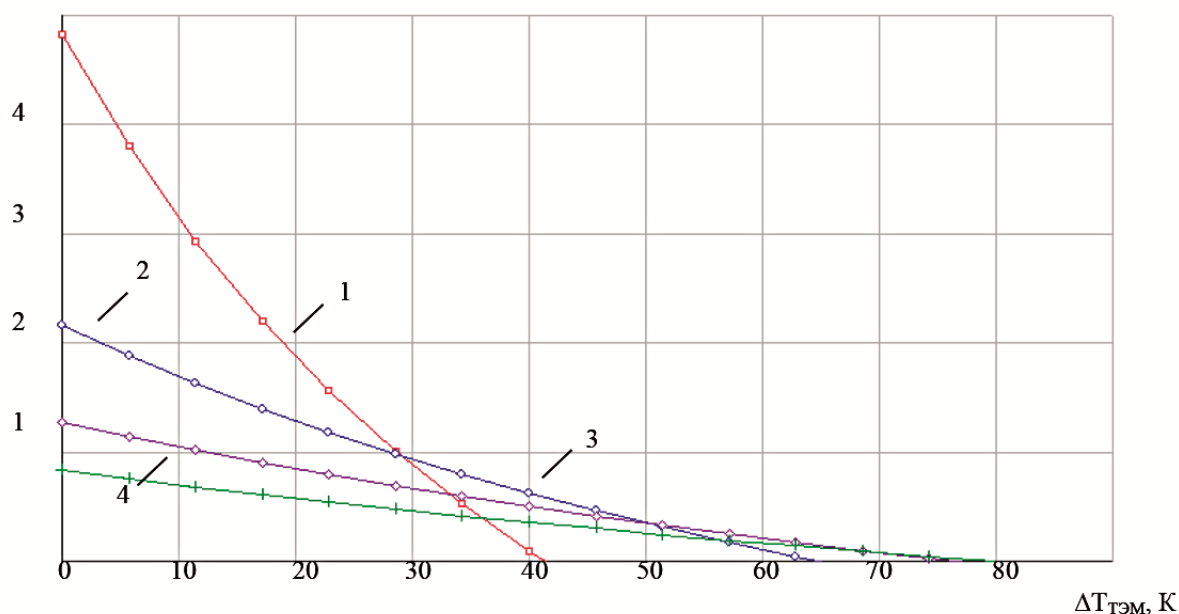


Рис.2. Зависимость холодильного коэффициента ТЭМ от перепада температур между спаями при различных значениях тока питания 1- $I_{ТЭМ}=1$ А, 2- $I_{ТЭМ}=2$ А, 3 - $I_{ТЭМ}=2,9$ А, 4 - $I_{ТЭМ}=3,9$ А

Fig.2 Dependence of the coefficient of performance of TEM on the temperature difference between the junctions at various values of the supply current 1- $I_{ТЭМ}=1$ А, 2- $I_{ТЭМ}=2$ А, 3 - $I_{ТЭМ}=2,9$ А, 4- $I_{ТЭМ}=3,9$ А

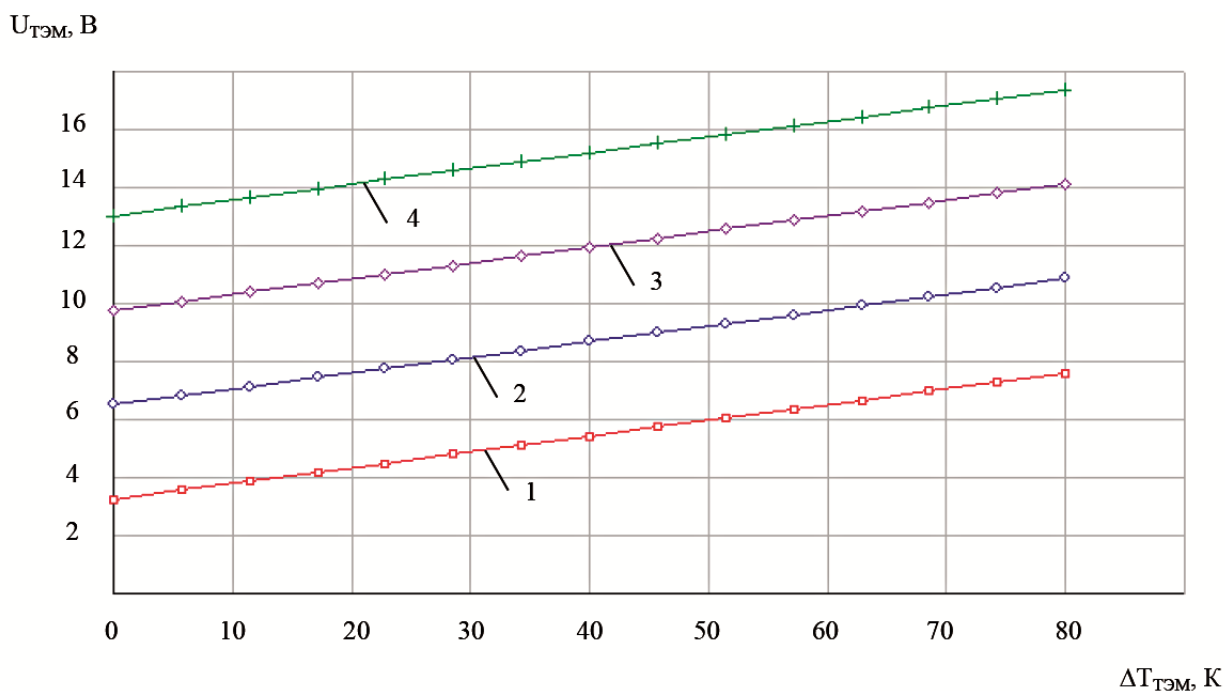


Рис.3. Зависимость напряжения питания ТЭМ от перепада температур между спаями при различных значениях тока питания 1- $I_{ТЭМ}=1$ А, 2- $I_{ТЭМ}=2$ А, 3 - $I_{ТЭМ}=2,9$ А, 4 - $I_{ТЭМ}=3,9$ А
 Fig.3. Dependence of the supply voltage of the TEM on the temperature difference between the junctions at different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

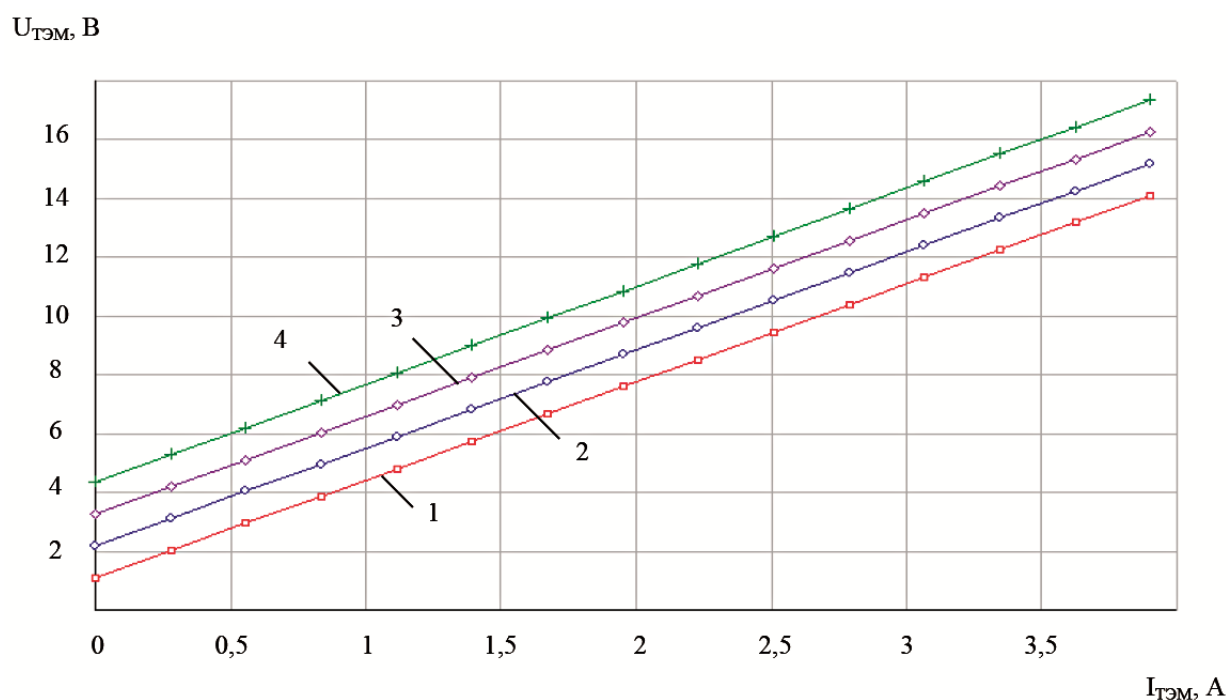


Рис.4. Зависимость напряжения ТЭМ от величины тока питания при различных значениях перепада температур между спаями 1- $\Delta T_{ТЭМ}=20$ К, 2- $\Delta T_{ТЭМ}=40$ К, 3 - $\Delta T_{ТЭМ}=60$ К, 4 - $\Delta T_{ТЭМ}=80$ К
 Fig.4. Dependence of the TEM voltage on the magnitude of the supply current at various values of the temperature difference between the junctions 1- $\Delta T_{ТЭМ}=20$ К, 2- $\Delta T_{ТЭМ}=40$ К, 3 - $\Delta T_{ТЭМ}=60$ К, 4 - $\Delta T_{ТЭМ}=80$ К

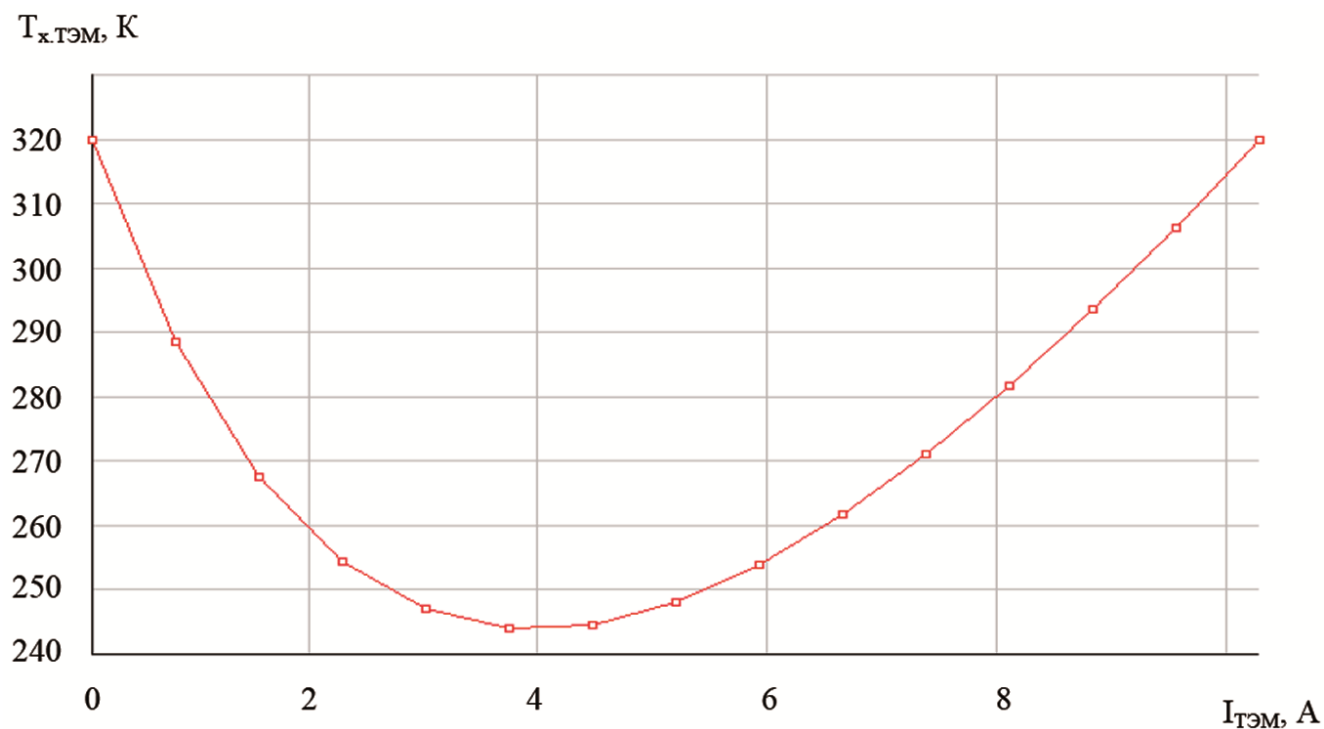


Рис.5. Зависимость температуры на холодном спае ТЭМ от тока питания
Fig.5. Dependence of the temperature at the cold junction of the TEM on the supply current

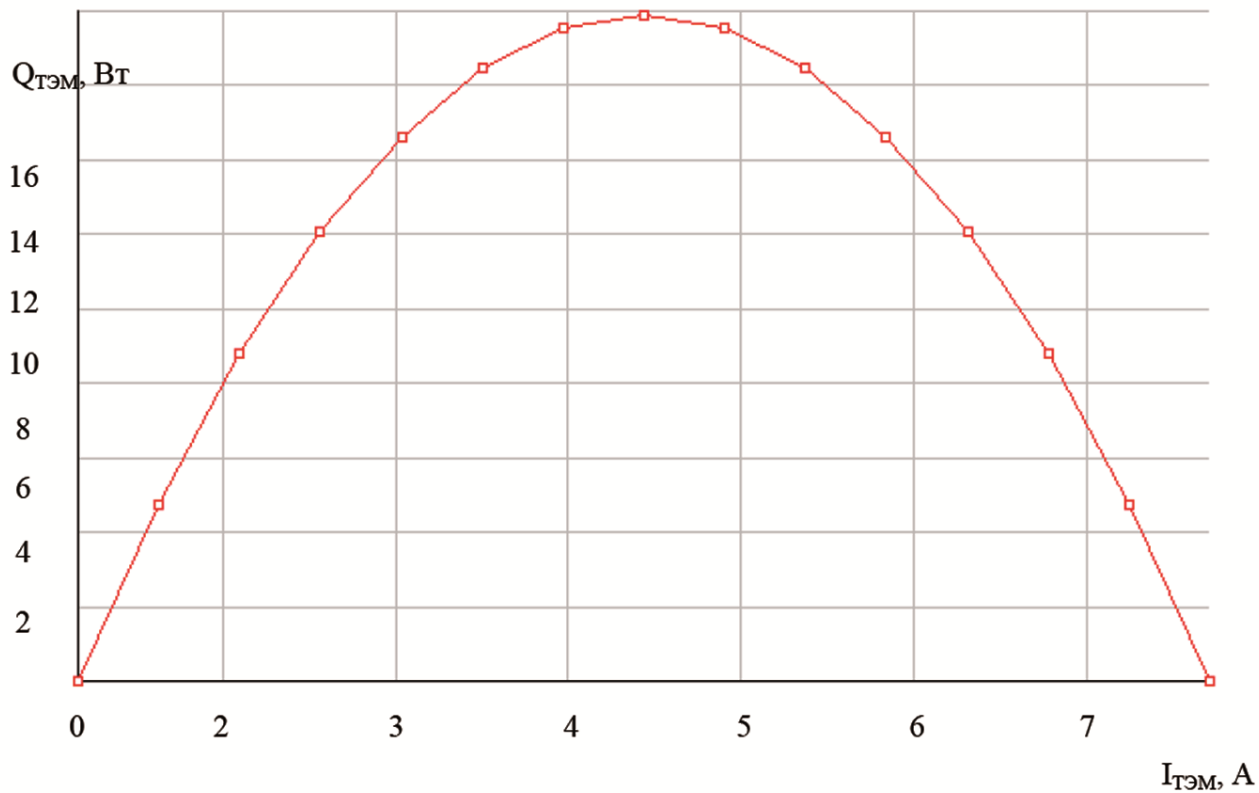


Рис.6. Зависимость мощности ТЭМ от тока питания
Fig.6. Dependence of TEM power on supply current

Вывод. Разработана расчетная модель термоэлектрического блока, входящего в состав системы для проведения тепловых физиотерапевтических процедур.

Модель построена на основе стандартных выражений для расчета электрических и геометрических параметров ТЭМ в зависимости от тепло- и электрофизических параметров материалов ТЭ, величин тепло- и холодопроизводительности, характеристик систем отвода теплоты от горячих спаев ТЭ.

В качестве примера рассмотрен расчет характеристик термоэлектрического блока, выполненного на основе стандартного ТЭМ типа ТВ-127-1,4-2,5, входящего в состав системы для проведения тепловых косметологических процедур.

Расчеты показали, что данный тип модуля соответствует требованиям проведения лечебных процедур.

Библиографический список:

1. Боголюбов, В.М. Техника и методики физиотерапевтических процедур / В.М. Боголюбов, [и др.]. - М.: Бином, 2017. - 464 с.
2. Баранов, А.Ю. Выбор альтернативного криоагента для покрытия тепловой нагрузки в установке для общего криотерапевтического воздействия / А.Ю. Баранов, А.В. Василенок, Е.В. Соколова, С.Д. Чубова, А.М. Зиявидинов // Вестник Международной академии холода. - 2022. - № 1. - С.76-82.
3. Ежов, В.В. Физиотерапия и физиопрофилактика как методы и средства сохранения и восстановления здоровья / В.В. Ежов // Физиотерапия, бальнеология и реабилитация. - 2011. - № 4. - С.33-36.
4. Зубкова, С.М. Роль тепловой компоненты в лечебном действии физических факторов / С.М. Зубкова // Физиотерапия, бальнеология и реабилитация. - 2011. - № 6. - С.3-10.
5. Pasquali P. Cryosurgery: a practical manual / P. Pasquali. - New York: Springer, 2015. - 441 p.
6. Давыдкин, Н.Ф. Применение физиотерапии в комплексном лечении переломов трубчатых костей / Н.Ф. Давыдкин // Физиотерапия, бальнеология и реабилитация. - 2013. - № 3. - С.27-34.
7. Боголюбов, В.М. Физиотерапия в реабилитации больных ревматоидным артритом / В.М. Боголюбов, В.Д. Сидоров // Физиотерапия, бальнеология и реабилитация. - 2012. - № 2. - С.3-9.
8. Цыганов Д.И. Криомедицина: процессы и аппараты М.: САЙНС-ПРЕСС, 2011. - 304 с.
9. Ежов, В.В. Применение сопочных вод и пелитов грязевых вулканов в санитарно-курортной практике / В.В. Ежов, В.И. Васенко, В.И. Мизин, А.Ю. Царев, Л.Ш. Дудченко, Т.Б. Игнатова // Вестник физиотерапии и курортологии. - 2020. - т.26, № 1. - С.72.
10. Будрик, В.В. Основы криотерапии, криохирургии и криоконсервации / В.В. Будрик. - М.: Лика, 2014. - 190 с.
11. Анатычук, Л.И. Об использовании термоэлектрического охлаждения в дерматологии и косметологии / Л.И. Анатычук, О.И. Денисенко, Р.Р. Кобылянский, Т.Я. Каденюк // Термоэлектричество. - 2015. - № 3. - С.57-71.
12. Пономаренко, Г.Н. Восстановительная медицина: фундаментальные основы и перспективы развития / Г.Н. Пономаренко // Физическая и реабилитационная медицина. - 2022. - т. 4, № 1. - С.8-20.
13. Yevdulov, O.V. Investigation of thermoelectric system for local freezing of tissues of the larynx / O.V. Yevdulov, T.A. Ragimova // Journal of Thermoelectricity. - 2015. - № 2. - P. 86-94.
14. Hu, B. Thermoelectrics for medical applications: progress, challenges and perspectives / B. Hu, X.-L. Shi, Z.-G. Chen., J. Zou // Chemical engineering journal. - 2022. - Vol. 437. - P.135268.
15. Zaferani, S.H. Thermoelectric coolers as thermal management systems for medical application: design, optimization and advancement / S.H. Zaferani, R. Ghomashchi, M.W. Sams, Z.-G. Chen // Nano energy. - 2021. - Vol. 90. - P. 106572.
16. Исмаилов, Т.А. Термоэлектрическое устройство для остановки кровотечения / Т.А. Исмаилов, О.В. Евдулов, Набиев Н.А., Т.А. Рагимова // Медицинская техника. - 2019. - №2. - С. 12-14.
17. Евдулов, О.В. Термоэлектрическая система для извлечения инородных объектов из тела человека / О.В. Евдулов, С.Г. Магомедова, И.Ш. Миспахов, Н.А. Набиев, А.М. Насрулаев // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. - 2019. - Т. 46, № 1. - С. 32-41.
18. Goldsmid, H.J. Thermoelectric refrigeration / H.J. Goldsmid. - New York: Springer, 2013. - 240 p.
19. Теория тепломассообмена / Под. ред. А.И. Леонтьева. - М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018. - 464 с.
20. Крайнов, А.Ю. Конвективный теплоперенос и теплообмен / А.Ю. Крайнов, К.М. Моисеева. Томск: СТУ, 2017. 80 с.
21. Исмаилов, Т.А. Термоэлектрическая система для проведения тепловых косметологических процедур на лице / Т.А. Исмаилов, О.В. Евдулов, У.И. Абдулхакимов, Д.В. Евдулов // Медицинская техника. - 2017. - № 4. - С.38-42.

References:

1. Bogolyubov V.M. Technique and methods of physiotherapeutic procedures[i. etc.]. M.: Binom, 2017; 464. (In Russ)
2. Baranov, A.Yu. Choice of an alternative cryoagent to cover the heat load in the installation for general cryotherapeutic exposure / A.Yu. Baranov, A.V. Vasilenok, E.V. Sokolova, S.D. Chubova, A.M. Ziyavidinov. *Bulletin of the International Academy of Refrigeration*. 2022; 1:76-82. (In Russ)
3. Ezhov, V.V. Physiotherapy and physioprofilaxis as methods and means of preserving and restoring health / V.V. Yezhov. *Physiotherapy, balneology and rehabilitation*. 2011; 4: 33-36. (In Russ)
4. Zubkova, S.M. The role of the thermal component in the therapeutic effect of physical factors / S.M. Zubkova. *Physiotherapy, balneology and rehabilitation*. 2011; 6:3-10. (In Russ)
5. Pasquali P. Cryosurgery: a practical manual / P. Pasquali. New York: Springer, 2015; 441.
6. Davydkin, N.F. The use of physiotherapy in the complex treatment of fractures of tubular bones / N.F. Davydkin . *Physiother-*

- apy, balneology and rehabilitation. 2013; 3: 27-34. (In Russ)
7. Bogolyubov, V.M. Physiotherapy in the rehabilitation of patients with rheumatoid arthritis / V.M. Bogolyubov, V.D. Sidorov. *Physiotherapy, balneology and rehabilitation*. 2012; 2:3-9. (In Russ)
 8. Tsyganov D.I. Cryomedicine: processes and devices. M.: SCIENCE-PRESS, 2011; 304. (In Russ)
 9. Ezhov, V.V. The use of hill waters and pelites of mud volcanoes in sanitary-resort practice / V.V. Ezhov, V.I. Vasenko, V.I. Mizin, A.Yu. Tsarev, L.Sh. Dudchenko, T.B. Ignatova. *Bulletin of physiotherapy and balneology*. 2020; 26:1; 72. (In Russ)
 10. Budrik, V.V. Fundamentals of cryotherapy, cryosurgery and cryopreservation. M: Lika, 2014; 190. (In Russ)
 11. Anatyshuk, L.I. On the use of thermoelectric cooling in dermatology and cosmetology / L.I. Anatyshuk, O.I. Denisenko, R.R. Kobylansky, T.Ya. Kadenyuk. *Thermoelectricity*. 2015; 3: 57-71.
 12. Ponomarenko G.N. Restorative medicine: fundamental foundations and development prospects. *Physical and rehabilitation medicine*. 2022; 4(1):8-20. (In Russ)
 13. Yevdulov, O.V. Investigation of thermoelectric system for local freezing of tissues of the larynx / O.V. Yevdulov, T.A. Ragimova. *Journal of Thermoelectricity*. 2015; 2: 86-94.
 14. Hu, B. Thermoelectrics for medical applications: progress, challenges and perspectives / B. Hu, X.-L. Shi, Z.-G. Chen., J. Zou. *Chemical engineering journal*. 2022; 437:135268.
 15. Zaferani, S.H. Thermoelectric coolers as thermal management systems for medical application: design, optimization and advancement / S.H. Zaferani, R. Ghomashchi, M.W. Sams, Z.-G. Chen. *Nano energy*. 2021; 90: 106572.
 16. Ismailov, T.A. Thermoelectric device to stop bleeding / T.A. Ismailov, O.V. Evdulov, Nabiev N.A., T.A. Ragimova. *Medical technology*. 2019; 2:12-14. (In Russ)
 17. Evdulov, O.V. Thermoelectric system for extracting foreign objects from the human body / O.V. Evdulov, S.G. Magomedova, I.Sh. Mispakhov, N.A. Nabiev, A.M. Nasrulaev. *Herald of the Dagestan State Technical University. Technical Science*. 2019; 46(1): 32-41. (In Russ)
 18. Goldsmid, H.J. Thermoelectric refrigeration / H.J. Goldsmid. New York: Springer. 2013; 240.
 19. Theory of heat and mass transfer / Ed. ed. A.I. Leontiev. M.: N.E. Bauman MSTU. 2018; 464. (In Russ)
 20. Krainov A.Yu. Convective heat transfer and heat exchange / A.Yu. Krainov, K.M. Moiseev. *Tomsk: STT*, 2017; 80 (In Russ)
 21. Ismailov T.A. Thermoelectric system for conducting thermal cosmetic procedures on the face / T.A. Ismailov, O.V. Evdulov, U.I. Abdulkhakimov, D.V. Evdulov. *Medical technology*. 2017; 4:38-42 (In Russ)

Сведения об авторах:

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

Хазамова Мадина Абдулаевна, кандидат технических наук, доцент, заведующая кафедрой теоретической и общей электротехники; ktioe@dstu.ru;

Абдулхакимов Умар Ильманович, соискатель кафедры теоретической и общей электротехники; pobeda66-66@mail.ru.

Гамзалова Ирина Юрьевна, аспирант кафедры теоретической и общей электротехники; ira.gamzalova@mail.ru.

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

Information about authors:

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

Madina A. Khazamova, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Head of the Department of Theoretical and General Electrical Engineering; ktioe@dstu.ru;

Umar I. Abdulkhakimov, Competitor of the Department of Theoretical and General Electrical Engineering; pobeda66-66@mail.ru.

Irina Yu. Gamzalova, Postgraduate Student of the Department of Theoretical and General Electrical Engineering; ira.gamzalova@mail.ru.

Ildar A. Gabitov, Senior Lecturer of the Department of Theoretical and General Electrical Engineering; gabito-via@mail.ru.

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 12.10.2022.

Одобрена после рецензирования/ Revised 29.10.2022.

Принята в печать/Accepted for publication 29.10.2022.

ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА
ENERGY AND ELECTRICAL ENGINEERING

УДК 621.56

DOI: 10.21822/2073-6185-2022-49-4-16-25

Оригинальная статья /Original Paper

Энтропийно-статистический анализ эффективности циклов холодильных агрегатов бытовых холодильников

Ю.В. Кудров

Российский государственный университет туризма и сервиса,
141221, Московская область, г.о. Пушкинский, дп. Черкизово, ул. Главная, 99, Россия

Резюме. Цель. Целью работы является определение термодинамической эффективности модернизированного холодильного агрегата бытового холодильника по сравнению с базовой моделью с помощью энтропийно-статистического метода. **Метод.** В ходе работы при проведении исследования применен научный метод системного анализа, а также энтропийно-статистический метод термодинамического анализа при определении эффективности холодильного цикла бытового холодильника. **Результат.** Проведен анализ распределения затрат энергии на компенсацию производства энтропии по узлам холодильного агрегата. Результаты анализа позволяют наглядно оценить энергетические потери в цикле бытового холодильника. Анализ проводился для наиболее популярных при использовании в бытовых холодильниках хладагентов R134a и R600a. На основе проведенных расчетов построены сравнительные диаграммы потерь энергии в процессах цикла. Энтропийно-статистический анализ показателей термодинамической эффективности цикла подтверждает преимущества модернизированного холодильного агрегата бытового холодильника. **Вывод.** В ходе работы было подтверждено, что использование модернизированного холодильного агрегата позволит снизить общие затраты энергии, а выбранный метод исследования позволяет наглядно оценить потери энергии по элементам цикла холодильного агрегата.

Ключевые слова: энтропийно-статистический метод, цикл холодильного агрегата, энтропия, энергетические потери, термодинамическая эффективность цикла

Для цитирования: Ю.В. Кудров. Энтропийно-статистический анализ эффективности циклов холодильных агрегатов бытовых холодильников. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022; 49(4):16-25. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-4-16-25

Entropy-statistical analysis of the efficiency of cycles of refrigeration units of household refrigerators

Yu. V. Kudrov

Russian State University of Tourism and Service,
99 Glavnaya Str., Cherkizovo, Urban district Pushkinsky, Moscow region 141221, Russia

Abstract. Objective. The aim of the work is to determine the thermodynamic efficiency of the modernized refrigeration unit of a household refrigerator compared to the basic model using the entropy-statistical method. **Method.** В ходе работы при проведении исследований применен научный метод системного анализа, а также энтропийно-статистический метод термодинамического анализа при определении эффективности холодильного цикла бытового холодильника. **Result.** The analysis of the distribution of energy costs to compensate for the production of entropy by the nodes of the refrigeration unit is carried out. This analysis allows us to visually assess the energy losses in the cycle of a household refrigerator. The analysis was carried out for the most popular refrigerants R134a and R600a when used in household refrigerators. Based on the calculations carried out, comparative diagrams of energy losses in cycle processes are constructed. The entropy-statistical analysis of the thermodynamic efficiency indicators of the cycle confirms the advantages of the modernized refrigeration unit of the household refrigerator. **Conclusion.** In the course of the work, it was confirmed that the use of an upgraded

refrigeration unit will reduce the total energy costs, and the chosen research method will visually assess the energy losses for the elements of the refrigeration unit cycle.

For citation: Yu. V. Kudrov. Entropy-statistical analysis of the efficiency of cycles of refrigeration units of household refrigerators. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science. 2022; 49 (4): 16-25. DOI: 10.21822 /2073-6185-2022-49-4-16-25

Введение. Проблема энергосбережения и энергоэффективности является одной из основных при проектировании и разработке новых технических устройств. Бытовые холодильные системы, в частности, бытовые холодильники, являются одним из основных потребителем электроэнергии в доме [1–6]. В настоящее время изготовлено огромное количество бытовых холодильно-морозильных камер, что в совокупности с индивидуальным и общественным кондиционированием резко повысило качество жизни [7]. Что бы быть конкурентноспособным требуется постоянное совершенствования холодильных систем. Одним из вариантов совершенствования является повышение энергоэффективности и снижения энергопотребления бытовых холодильных приборов [1 – 10].

Повышение энергоэффективности бытовой холодильной техники является актуальной задачей в настоящее время [11 – 16]. Для решения проблем энергосбережения холодильной техники требуются уточнение и развитие, в первую очередь, теоретических подходов для осмысления и нахождения путей их усовершенствования [1, 7, 13 – 19].

На стадиях исследования, анализа и проектирования энергооборудования реальные величины затрачиваемой работы могут быть в первом приближении определены расчетными методами, базирующимися на принципах сохранения массы и энергии, а также на принципе возрастания энтропии в адиабатически изолированной системе вследствие необратимости рабочих процессов. [7, 13, 18, 19]. Проведенный энтропийно-статистический метод термодинамического анализа позволяет оценить потери в отдельных процессах и элементах холодильного цикла. Ценность данного метода состоит в возможности установления связи между отдельными потерями, а также влияния каждой локальной необратимости на эффективность установки в целом [7, 13, 18, 19].

Постановка задачи. В работах [1, 2, 8, 20] описывается устройство модернизированного холодильного агрегата бытового холодильника. Отличительной особенностью данной схемы является разделение потока хладагента в процессе дросселирования в пароотделителе, а также использование двух теплоизолированных теплообменников. Данные решения позволяют повысить термодинамическую эффективность холодильного цикла [1]. В работе [1] проведен сравнительный анализ термодинамической эффективности цикла модернизированного холодильного агрегата. Проведенные исследования показывают, что использование предлагаемого технического решения позволяют увеличить энергетическую эффективность холодильного агрегата, а также повысить его холодопроизводительность от 1,5 до 8,6% в зависимости от исходных параметров и применяемого хладагента. В данной работе предлагается оценить потери в отдельных процессах и элементах холодильного цикла, а также сравнить их с потерями в базовом холодильном цикле бытового холодильника при работе на хладагентах R134a и R600a.

Методы исследования. В работе применен теоретический метод исследования. Проведен энтропийно-статистический анализ циклов базового и модернизированного холодильных агрегатов при работе на озонобезопасных хладагентах R134a и R600a.

Данный метод позволяет получить распределение потерь по элементам холодильного агрегата и определить эффективность модернизированного холодильного агрегата.

Расчет показателей цикла осуществлялся по методике, представленной в работе [7]:

Удельная массовая холодопроизводительность:

$$q_0 = i_5 - i_2 \quad (1)$$

Минимально необходимая удельная работа (электроэнергия) для генерации холода q_0 при T_0 :

$$l_{\min.\text{исп.}} = q_0[(T_{0.\text{с.}} - T_0)/T_0] \quad (2)$$

Минимально необходимая удельная работа (электроэнергия) для генерации холода q_0 при $T_{\text{МК}}$:

$$l_{\min.\text{МК}} = q_0[(T_{0.\text{с.}} - T_{\text{МК}})/T_{\text{МК}}] \quad (3)$$

Удельная адиабатическая работа сжатия:

$$l_{\text{ад}} = i_7 - i_6 \quad (4)$$

Действительная затраченная удельная работа сжатия:

$$l_{\text{сж}} = l_{\text{ад}}/\eta_{\text{ад}} \quad (5)$$

Степень термодинамического совершенства цикла:

$$\eta_{\text{терм}} = l_{\min}/l_{\text{сж}} \quad (6)$$

Холодильный коэффициент при адиабатном процессе сжатия:

$$\varepsilon_{\text{ад}} = q_0/l_{\text{ад}} \quad (7)$$

Действительный холодильный коэффициент:

$$\varepsilon_{\text{д}} = q_0/l_{\text{сж}} \quad (8)$$

Максимальная работа, которая могла бы быть возвращена при охлаждении хладагента от температуры T_7 до T_8 с передачей теплоты $(i_7 - i_8)$ в окружающую среду обратимым путем:

$$\Delta l_{\text{ПК}} = (i_7 - i_8) - T_{0.\text{с.}}(S_7 - S_8) \quad (9)$$

Необходимые минимальные удельные затраты работы сжатия для компенсации производства энтропии при конденсации паров хладагента в конденсаторе:

$$\Delta l_{\text{к.к}} = T_{0.\text{с.}}\Delta S_{\text{к.к}} = T_{0.\text{с.}}q_{\text{к}}\left(\frac{1}{T_{0.\text{с.}}} - \frac{1}{T_{\text{к}}}\right) = T_{0.\text{с.}}(i_8 - i_9)\left(\frac{1}{T_{0.\text{с.}}} - \frac{1}{T_{\text{к}}}\right) \quad (10)$$

Необходимые минимальные удельные затраты работы сжатия для компенсации производства энтропии в конденсаторе:

$$\Delta l_{\text{к.д}} = \Delta l_{\text{ПК}} + \Delta l_{\text{к.к}} \quad (11)$$

Требуемые минимальные удельные затраты работы сжатия для компенсации производства энтропии при дросселировании:

$$\Delta l_{\text{др}} = T_{0.\text{с.}}\Delta S_{\text{др}} \quad (12)$$

Необходимая минимальная работа сжатия для компенсации производства энтропии в испарителе при передаче теплоты q_0 из камеры холодильника:

$$\Delta l_{\text{и}} = T_{0.\text{с.}}\Delta S_0 = T_{0.\text{с.}}q_0\left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_{\text{и}}}\right) \quad (13)$$

Требуемая минимальная работа сжатия для компенсации производства энтропии в рекуперативном теплообменнике 1:

$$\Delta l_{\text{Т01}} = T_{0.\text{с.}}\Delta S_{\text{рек.}} = T_{0.\text{с.}} \cdot (S_{12} - S_{12}) - (S_9 - S_{10}) \quad (14)$$

Требуемая минимальная работа сжатия для компенсации производства энтропии в рекуперативном теплообменнике 2:

– для базового холодильного агрегата (ХА):

$$\Delta l_{\text{Т02.Б}} = T_{0.\text{с.}}\Delta S_{\text{рек.}} = T_{0.\text{с.}} \cdot (S_6 - S_5) - (S_3 - S_4) \quad (15)$$

– для модернизированного ХА:

$$\Delta l_{\text{Т02.М}} = T_{0.\text{с.}}\Delta S_{\text{рек.}} = T_{0.\text{с.}} \cdot (S_{14} - S_{13}) - (S_{3*} - S_{4*}) \quad (16)$$

Сумма минимальных работ для компенсации производства энтропии в холодильном цикле во всех элементах ХА:

$$l_{\text{ад.расч}} = l_{\min} + \sum \Delta l \quad (17)$$

Энергетические потери в компрессоре:

$$\Delta l_{\text{км}} = l_{\text{сж}} - l_{\text{ад}} = l_{\text{ад.расч}}(1/\varepsilon_{\text{ад}} - 1) \quad (18)$$

Расчетная работа сжатия:

$$l_{\text{сж.расч}} = l_{\text{ад.расч}} + \Delta l_{\text{км}} \quad (19)$$

Исходные данные для расчета и анализа базового и модернизированного цикла холодильного агрегата:

Температура окружающей среды, °С (К) +32 (305)
Температура кипения хладагента, °С (К) –30 (243)
Температура конденсации хладагента, °С (К) +40 (313)
Температура перегрева хладагента, °С (К) +32 (305)
Температура переохлаждения хладагента, °С (К) +38 (311)
Адиабатический коэффициент компрессора, $\eta_{ад}$ 0,8

Обсуждение результатов. Проведем анализ базового цикла холодильного агрегата (рис. 1.). Основные реперные точки цикла холодильного агрегата, работающего на хладагенте R134a представлены в табл. 1.

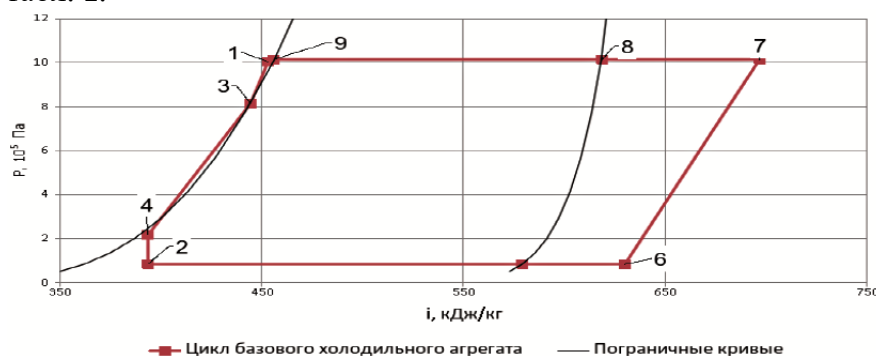


Рис. 1. Теоретический цикл базового холодильного агрегата в P-I диаграмме. $T_0 = -30^\circ\text{C}$, $T_{oc} = 32^\circ\text{C}$, $T_k = 40^\circ\text{C}$

Fig. 1. Theoretical cycle of the basic refrigeration unit in the P-I diagram. $T_0 = -30^\circ\text{C}$, $T_{oc} = 32^\circ\text{C}$, $T_c = 40^\circ\text{C}$

Таблица 1. Реперные точки базового цикла холодильного агрегата. Хладагент R134a
Table 1. Fixed points of the basic cycle of the refrigeration unit. Refrigerant R134a

№ точки	t, °C	P, 10^5 Па	i, кДж/кг	S, кДж/кгК
6	32	0.848	630.13	4.9332
7	114	10.158	696.89	4.9332
8	40	10.158	618.74	4.7089
9	40	10.158	456.10	4.1895
1	38	10.058	453.16	4.1802
3	32	8.148	444.46	4.1524
4	-8.0	2.173	393.63	3.9769
2	-30	0.848	393.63	3.9838
5	-30	0.848	579.30	4.7474
6	32	0.848	630.13	4.9332

Результаты расчетов приведены в табл. 3. Энергетические потери по элементам базового холодильного агрегата представлены на рис. 2. Анализ цикла базового холодильного агрегата (рис.2) показал, что максимальные значения потерь приходятся на компрессор, конденсатор и испаритель. Снижение затрат энергии в данных элементах требует внесение изменений в саму конструкцию данных устройств.

Затраты работы на дросселирование и рекуперативный теплообменник в сумме составляют порядка 11,5 % от общих затрат на основные элементы холодильного цикла, что тоже имеет интерес по снижению их энергетических затрат. Уменьшить затраты энергии на дросселирование и теплообменник можно путем изменения конструкции холодильного агрегата и, соответственно, его цикла.

Проведем анализ модернизированного цикла холодильного агрегата (рис.3) [1, 2, 8]. Основные реперные точки цикла холодильного агрегата, работающего на хладагенте R134a представлены в табл. 2.



Рис.2. Энергетические потери по элементам базового холодильного агрегата
Fig.2. Energy losses by elements of the basic refrigeration unit



Рис.3. Теоретический цикл модернизированного холодильного агрегата в P-I диаграмме.
 $T_0 = -30^\circ\text{C}$, $T_{oc} = 32^\circ\text{C}$, $T_k = 40^\circ\text{C}$

Fig.3. Theoretical cycle of the modernized refrigeration unit in the P-I diagram. $T_0 = -30^\circ\text{C}$, $T_{oc} = 32^\circ\text{C}$, $T_c = 40^\circ\text{C}$

Таблица 2. Реперные точки модернизированного цикла холодильного агрегата. Хладагент R134a
Table 2. Fixed points of the modernized cycle of the refrigeration unit. Refrigerant 134a

№ точки	t, °C	P, $\times 10^5$ Па	i, кДж/кг	S, кДж/кг $\times$ К
6	32.0	0.848	630.130	4.9332
7	114.0	10.158	696.892	4.9332
8	40.0	10.158	618.740	4.7089
9	40.0	10.158	456.100	4.1895
10	36.7	10.158	451.216	4.1742
1*	35.7	10.058	448.790	4.1663
3	-5.0	2.437	431.790	4.1190
3*	-4.0	2.437	394.630	3.9804
4*	-16.1	1.570	380.357	3.9265
2	-30.0	0.848	380.357	3.9292
5	-30.0	0.848	579.300	4.7474
13	-25.5	0.848	582.792	4.7616
14	-7.5	0.848	597.065	4.8172
11	-5.5	0.848	598.677	4.8233
12	0.5	0.848	603.561	4.8413

Результаты расчетов приведены в табл.3. Энергетические потери по элементам модернизированного холодильного агрегата представлены на рис. 4.

Сравнительная диаграмма двух циклов холодильных агрегатов, работающих на хладагенте R134a, представлена на рис. 5.

**Таблица 3. Результаты энтропийно-статистического метода термодинамического анализа.
Хладагент R134a**

Table 3. Results of the entropy-statistical method of thermodynamic analysis. Refrigerant R134a

Параметр/ Parameter	Значение/ Meaning	
	Цикл/ Cycle 1 (базовый/ base)	Цикл/ Cycle 2 (модерн./ modernized)
Удельная массовая холодопроизводительность q_0 , кДж/кг Specific mass cooling capacity	185.7	198.9
Минимально необходимая удельная работа (электроэнергия) для генерации холода $l_{min.мк.}$, кДж/кг Minimum required specific work (electricity) for cold generation $l_{(min.mk.)}$,	36.41	39.01
Затраченная удельная работа сжатия, кДж/кг Spent specific compression work	83.45	
Удельная адиабатная работа сжатия, кДж/кг Specific adiabatic work of compression	66.76	
Энергетические потери в компрессоре $\Delta l_{км}$, кДж/кг Energy losses in the compressor	16,71	16,78
Холодильный коэффициент адиабатный $\varepsilon_{ад}$ Adiabatic coefficient of performance	2.78	2.98
Действительный холодильный коэффициент ε_d Actual coefficient of performance	2.22	2.38
Удельные затраты работы для компенсации производства энтропии в конденсаторе $\Delta l_{к.д}$, кДж/кг Specific costs of work to compensate for the production of entropy in the capacitor	13,9	
Удельные затраты работы для компенсации производства энтропии при дросселировании $\Delta l_{др}$, кДж/кг Specific work costs to compensate for the production of entropy during throttling	2.32	0.82
Удельные затраты работы для компенсации производства энтропии в испарителе $\Delta l_{и}$, кДж/кг Specific work costs to compensate for the production of entropy in the evaporator	10.97	11.75
Удельные затраты работы для компенсации производства энтропии в теплообменнике 1 $\Delta l_{Т01}$, кДж/кг Specific costs of work to compensate for the production of entropy in the heat exchanger	-	0.82
Удельные затраты работы для компенсации производства энтропии в теплообменнике 2 $\Delta l_{Т02}$, кДж/кг Specific costs of work to compensate for the production of entropy in the heat exchanger	3.14	0.52
Удельные затраты работы для компенсации производства энтропии в других процессах, кДж/кг Specific costs of work to compensate for the production of entropy in other processes, kJ/kg	0.1	0.29

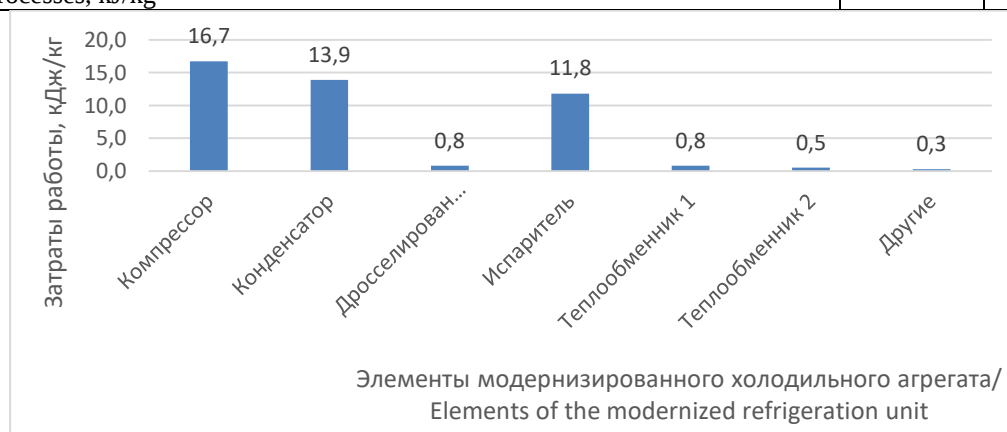


Рис.4. Энергетические потери по элементам модернизированного холодильного агрегата
Fig.4. Energy losses by elements of the modernized refrigeration unit

Из анализа видно, что при небольшом увеличении затрачиваемой работы на процесс кипения в испарителе с 11,0 до 11,8 кДж/кг, а также дополнительных затрат на компенсацию производства энтропии в теплообменнике 1 (+0,8 кДж/кг), выигрыш на потерях в процессе дросселирования и теплообменнике 2 составляет 34,7% и 16,1% соответственно. Общие потери рабо-

ты на элементах холодильного агрегата снизятся при этом примерно на 5%. Холодопроизводительность модернизированного холодильного агрегата при работе на хладагенте R134a возрастает, примерно, на 7%.

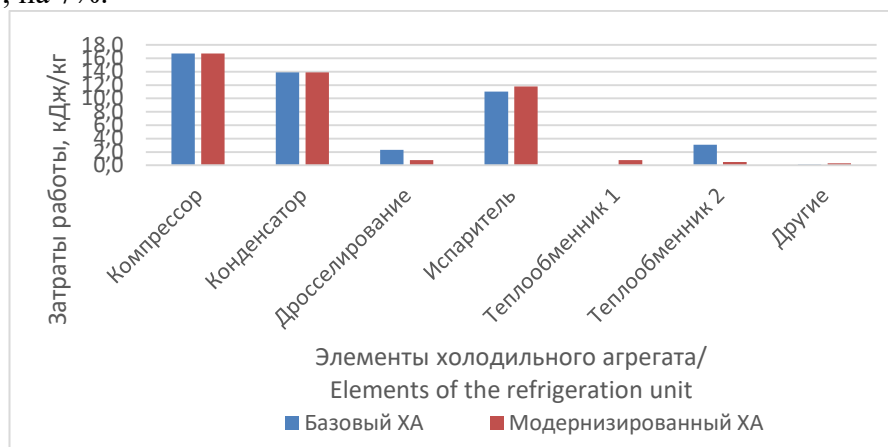


Рис.5. Энергетические потери по элементам холодильного агрегата. Хладагент R134a

Fig.5. Energy losses by the elements of the refrigeration unit. Refrigerant R134a

Для анализа эффективности модернизированного холодильного агрегата по сравнению с базовым при работе на хладагенте R600a проведем аналогичное сравнение циклов холодильных агрегатов (рис. 6).

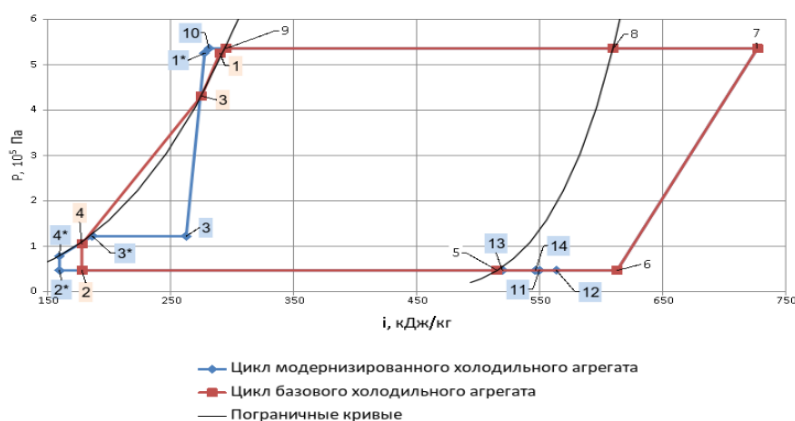


Рис.6. Сравнение циклов холодильных агрегатов, работающих на хладагенте R600a. $T_0 = -30^\circ\text{C}$, $T_{oc} = 32^\circ\text{C}$, $T_k = 40^\circ\text{C}$

Fig.6. Comparison of cycles of refrigeration units operating on R600a refrigerant. $T_0 = -30^\circ\text{C}$, $T_{oc} = 32^\circ\text{C}$, $T_c = 40^\circ\text{C}$

Основные реперные точки базового и модернизированного циклов холодильного агрегата, работающих на хладагенте R600a представлены в табл. 3 и 4. Результаты расчетов представлены в табл.5.

Таблица 3. Реперные точки базового цикла холодильного агрегата. Хладагент R600a

Table 3. Fixed points of the basic cycle of the refrigeration unit. Refrigerant R600a

№ точки	$t, ^\circ\text{C}$	$P, \times 10^5 \text{ Па}$	$i, \text{ кДж/кг}$	$S, \text{ кДж/кг} \times \text{К}$
6	32	0.468	612.9638	2.6697
7	99	5.359	727.0269	2.6697
8	40	5.359	609.8300	2.3272
9	40	5.359	295.1800	1.3225
1	38	5.259	290.1600	1.3065
3	32	4.314	275.2800	1.2587
4	-11	1.048	177.9062	0.9180
2	-30	0.468	177.9062	0.9255
5	-30	0.468	515.5900	2.3143
6	32	0.468	612.9638	2.6697

Таблица 4. Реперные точки модернизированного цикла холодильного агрегата. Хладагент R600a
Table 4. Fixed points of the modernized cycle of the refrigeration unit. Refrigerant R600a

№ точки	t, °C	P, ×10 ⁵ Па	i, кДж/кг	S, кДж/кг×К
6	32.0	0.468	612.9638	2.6697
7	99.0	5.359	727.0269	2.6697
8	40.0	5.359	609.8300	2.3272
9	40.0	5.359	295.1800	1.3225
10	34.2	5.359	281.1991	1.2763
1*	33.2	5.259	277.7400	1.2667
3	-7.0	1.222	262.7400	1.2368
3*	-6.0	1.222	186.5000	0.9502
4*	-18.2	0.7846	159.7670	0.8481
2*	-30.0	0.468	159.7670	0.8509
5	-30.0	0.468	515.5900	2.3143
13	-27.0	0.468	519.9186	2.3318
14	-9.0	0.468	546.6516	2.4367
11	-7.0	0.468	549.7138	2.4482
12	2.0	0.468	563.6947	2.4998

Таблица 5. Результаты энтропийно-статистического метода термодинамического анализа. Хладагент R600a
Table 5. Results of the entropy-statistical method of thermodynamic analysis. Refrigerant R600a

Параметр/ Parameter	Значение/ Meaning	
	Цикл/ Cycle 1 (базовый/ base)	Цикл/ Cycle 2 (модерн./ modernized)
Удельная массовая холодопроизводительность q_0 , кДж/кг Specific mass cooling capacity	337.70	355.82
Минимально необходимая удельная работа (электроэнергия) для генерации холода $l_{min,мк}$, кДж/кг Minimum required specific work (electricity) for cold generation	66.22	69.77
Затраченная удельная работа сжатия, кДж/кг Spent specific compression work	142.58	
Удельная адиабатная работа сжатия, кДж/кг Specific adiabatic work of compression	114,06	
Энергетические потери в компрессоре $\Delta l_{км}$, кДж/кг Energy losses in the compressor	28,5	28,8
Холодильный коэффициент адиабатный $\varepsilon_{ад}$ Adiabatic coefficient of performance	2.96	3.12
Действительный холодильный коэффициент ε_d Actual coefficient of performance	2.37	2.50
Удельные затраты работы для компенсации производства энтропии в конденсаторе $\Delta l_{к,д}$, кДж/кг Specific costs of work to compensate for the production of entropy in the capacitor	20,78	
Удельные затраты работы для компенсации производства энтропии при дросселировании $\Delta l_{др}$, кДж/кг Specific work costs to compensate for the production of entropy during throttling	2.59	0,85
Удельные затраты работы для компенсации производства энтропии в испарителе $\Delta l_{и}$, кДж/кг Specific work costs to compensate for the production of entropy in the evaporator	19.95	21.02
Удельные затраты работы для компенсации производства энтропии в теплообменнике 1 Δl_{T01} , кДж/кг Specific costs of work to compensate for the production of entropy in the heat exchanger	-	1.65
Удельные затраты работы для компенсации производства энтропии в теплообменнике 2 Δl_{T02} , кДж/кг Specific costs of work to compensate for the production of entropy in the heat exchanger	4.48	0.85
Удельные затраты работы для компенсации производства энтропии в других процессах, кДж/кг Specific costs of work to compensate for the production of entropy in other processes, kJ/kg	0.14	0,24

Представим результаты расчетов в графическом виде (рис. 7). Анализ энергетических потерь при работе на хладагенте R600a показывает, что их увеличение наблюдается в компрессоре примерно на 1% и в процессе кипения хладагента в испарителе на 5,5%. При этом сокращаются потери при дросселировании на 34% и в теплообменнике 42%.

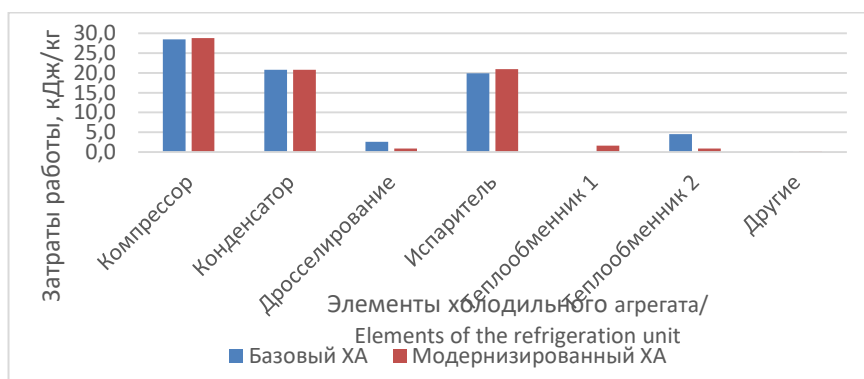


Рис.7. Энергетические потери по элементам холодильного агрегата. Хладагент R600a

Fig.7. Energy losses by the elements of the refrigeration unit. Refrigerant R600a

Общие энергетические потери на элементах холодильного агрегата снизятся при этом примерно на 3%. Холодопроизводительность модернизированного холодильного агрегата при работе на хладагенте R600a возрастает на 5%.

Вывод. Использование энтропийно-статистического метода термодинамического анализа при определении эффективности модернизированного цикла холодильного агрегата позволяет наглядно оценить его преимущества по сравнению с циклом базового холодильного агрегата. Использование модернизированного холодильного агрегата позволяет значительно снизить энергетические затраты при дросселировании и в рекуперативном теплообменнике, что приводит к снижению общих затрат энергии при работе холодильного агрегата. Расхождение, полученное при данном анализе, значений адиабатической работы сжатия с ее значениями, определенными по циклу холодильного агрегата, не превышает 1%. Результаты энтропийно-статистического метода термодинамического анализа в целом коррелируются с результатами работы [1], что в совокупности говорит о достоверности результатов о реальном распределении затрат энергии по основным элементам исследуемых холодильных циклов.

Библиографический список:

1. Comparative analysis of thermodynamic efficiency of cycles for various flowcharts of refrigerating unit. Sumzina L.V., Maksimov A.V., Kudrov Yu.V. International Journal of Emerging Trends in Engineering Research. 2020; 8(8):
2. Ю.В. Кудров, Л.В. Сумзина, А.В. Максимов, С.Л. Филимонов. Калориметрический стенд для исследования процессов в холодильном агрегате. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. Том 49 (2), 2022. С.18-23.
3. Оценка эффективности термодинамических циклов парокомпрессионных холодильных машин и тепловых насосов. Калнинь И.М., Фадеков К.Н. Холодильная техника. 2006. №3. С. 16-25.
4. Анализ методов увеличения энергоэффективности компрессионных холодильников. Резников В.С., Романов П.В. Интеллектуальный потенциал XXI века: ступени познания. 2014. № 23. С. 143-146.
5. Сумзина Л.В., Кочеткова Я.А., Аржанов П.А., Бурцев И.А., Литвиненко А.А. Влияние рекуперативного теплообмена на эффективность цикла холодильного агрегата // Интернет-журнал «Отходы и ресурсы» Том 3, №2 (2016) <http://resources.today/PDF/07RRO216.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.;
6. Способ повышения энергоэффективности холодильников / Сучилин В.А., Максимов А.В., Сумзина Л.В., Бурцева Л.А.: пат. 2630813 С2 РФ. №F25B 1/00 (2006.01); заявл. 30.10.2015; опубл. 04.05.2017, Бюл. №13; 7 с.
7. Основы криологии. энтропийно-статистический анализ низкотемпературных систем / А.М. Архаров. – М.: Изд-во МГТУ им Н.Э. Баумана. 2014. – 507.
8. Сумзина Л.В., Максимов А.В., Кудров Ю.В., Кочетков А.С. Энергоэффективный холодильный агрегат для двухкамерных холодильников и морозильников бытового и промышленного назначения // Промышленный сервис. 2019. № 1 (70). С. 24-26.
9. Сумзина Л.В. Повышение энергетической эффективности бытовых компрессионных холодильников с двухиспарительной системой охлаждения. диссертация ... кандидата технических наук: 05.02.13. - Москва, 1994.
10. Максимов А.В., Коляда В.В., Сиротенко Я.А. Зависимость показателей термодинамической эффективности цикла холодильного агрегата от температуры переохлаждения в теплообменнике // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2012. Т. 8. №2
11. Сумзина Л.В., Максимов А.В., Кудров Ю.В. Сравнительный анализ циклов бытового холодильника на хладагентах R134A, R600A. Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2012. Т. 8. № 2. С. 57-59.
12. Лемешко М.А. Технологии повышения энергетической эффективности бытовых холодильных приборов // Фундаментальные и прикладные исследования: проблемы и результаты. –2014. –№ 13. –С. 188-196.
13. Analysis of thermodynamic efficiency of small-scale natural gas liquefying plant operating on medium-pressure cycle. Arkharov A.M., Semenov V.Y. Chemical and Petroleum Engineering. 2016. Т. 51. № 9. С. 656-664.
14. Сумзина Л.В., Максимов А.В. Анализ потерь эксергии в цикле компрессионного бытового холодильника // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2012. Т. 8. № 1. С. 37-39.;

15. Максимов А.В., Кудров Ю.В., Равилов Ф.А., Бурцева Л.А. Особенности процесса дросселирования хладагента в капиллярных трубках. Интернет-журнал «Отходы и ресурсы», 2016, Т.3, №2 <http://resources.today/PDF/01RRO216.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.;
16. Холодильный агрегат с теплообменником-докипатель/Максимов А.В., Сумзина Л.В., Кочеткова Я.А.: пат. 155867 Р Ф. №F25D 11/00 (2006.01); заявл. 29.05.2015; опубл. 20.10.2015, Бюл. №29; 5 с.
17. Особенности идеализированных циклов парокомпрессорных холодильных машин. Вассерман А.А., Лавренченко Г.К., Слынько А.Г. Технические газы. 2014. № 6 (2014). С. 30-36.
18. Архаров А.М., Шишов В.В., Талызин М.С. Энтропийно-статистический анализ низкотемпературных холодильных циклов и выбор на его основе оптимальной системы холодоснабжения магазина // Холодильная техника. 2016. № 3. С. 30-34.
19. Архаров А.М., Шишов В.В., Шамсутдинов И.Р., Серебряков Н.Ю. Энтропийно-статистический анализ холодильных циклов для "шоковой" заморозки // Холодильная техника. 2015. № 11. С. 38-42.
20. Патент РФ № 2018125056, №F25D 11/00 (2006.01); заявл. 10.07.2018 Холодильный агрегат для двухкамерного холодильника / Сумзина Л.В., Максимов А.В., Кудров Ю.В. // опубл. 15.01.2019, Бюл. №2

References:

1. Comparative analysis of thermodynamic efficiency of cycles for various flowcharts of refrigerating unit. Sumzina L.V., Maksimov A.V., Kudrov Yu.V. *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*. 2020; 8(8):
2. Yu.V. Kudrov, L.V. Sumzina, A.V. Maksimov, S.L. Filimonov. Calorimetric stand for the study of processes in the refrigeration unit. *Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences*. 2022; 49 (2): 18-23.(In Russ)
3. Evaluation of the efficiency of thermodynamic cycles of steam compression refrigerating machines and heat pumps. Kalnin I.M., Fadekov K.N. *Refrigeration technology*. 2006; 3:16-25. (In Russ)
4. Analysis of methods for increasing the energy efficiency of compression refrigerators. Reznikov V.S., Romanov P.V. Intellectual potential of the XXI century: stages of cognition. 2014; 23: 143-146. (In Russ)
5. Sumzina L.V., Kochetkova Ya.A., Arzhanov P.A., Burtsev I.A., Litvinenko A.A. Influence of regenerative heat exchange on the efficiency of the refrigeration unit cycle. *Online magazine "Waste and Resources"* 2016; 3(2) <http://resources.today/PDF/07RRO216.pdf> (access is free). Cover from the screen. (In Russ)
6. A way to increase the energy efficiency of refrigerators / Suchilin V.A., Maksimov A.V., Sumzina L.V., Burtseva L.A.: pat. 2630813 C2 Ros. Federation. no.F25B 1/00 (2006.01); application 30.10.2015; publ. 04.05.2017;13: 7 . (In Russ)
7. Fundamentals of cryology. Entropy-statistical analysis of low-temperature systems / A.M. Arkharov. M.: Publishing House of Bauman Moscow State Technical University. 2014;507. (In Russ)
8. Sumzina L.V., Maksimov A.V., Kudrov Yu.V., Kochetkov A.S. Energy-efficient refrigeration unit for two-chamber refrigerators and freezers for domestic and industrial use. *Industrial service*. 2019; 1(70): 24-26. (In Russ)
9. Sumzina L.V. Improving the energy efficiency of household compression refrigerators with a two-vapor cooling system. dissertation ... Candidate of Technical Sciences: 05.02.13. Moscow, 1994. (In Russ)
10. Maksimov A.V., Kolyada V.V., Sirotenko Ya.A. The dependence of the thermodynamic efficiency indicators of the refrigeration unit cycle on the supercooling temperature in the heat exchanger. *Electrotechnical and information complexes and systems*. 2012; 8(2): (In Russ)
11. Sumzina L.V., Maksimov A.V., Kudrov Yu.V. Comparative analysis of the cycles of a household refrigerator with refrigerants R134A, R600A. *Electrical and information complexes and systems*. 2012; 8(2): 57-59. (In Russ)
12. Lemeshko, M.A. Technologies for increasing the energy efficiency of household refrigerating appliances. *Fundamental and applied research: problems and results*. 201; 13:188-196. (In Russ)
13. Analysis of thermodynamic efficiency of small-scale natural gas liquefying plant operating on medium-pressure cycle. Arkharov A.M., Semenov V.Y. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2016; 51(9.): 656-664.
14. Sumzina L.V., Maksimov A.V. Analysis of exergy losses in the cycle of a compression household refrigerator. *Electrical and information complexes and systems*. 2012; 8(1): 37-39. (In Russ)
15. Maksimov A.V., Kudrov Yu.V., Ravilov F.A., Burtseva L.A. Features of the process of throttling refrigerant in capillary tubes // Online journal "Waste and resources" 2016; 3(2) <http://resources.today/PDF/01RRO216.pdf> (access is free). Cover from the screen. Яз. рус., Eng.; (In Russ)
16. Refrigerating unit with heat exchanger / Maksimov A.V., Sumzina L.V., Kochetkova Ya.A.: pat. 155867 Ros. Federation. No. F25D 11/00 (2006.01); application. 29.05.2015; publ. 20.10.2015; 29: 5. (In Russ)
17. Features of idealized cycles of steam compressor refrigerating machines. Wasserman A.A., Lavrenchenko G.K., Slynko A.G. *Technical gases*. 2014; 6: 30-36. (In Russ)
18. Arkharov A.M., Shishov V.V., Talyzin M.S. Entropy-statistical analysis of low-temperature refrigeration cycles and the choice based on it of the optimal cooling system of the store. *Refrigerating equipment*. 2016; 3: 30-34. (In Russ)
19. Arkharov A.M., Shishov V.V., Shamsutdinov I.R., Serebryakov N.Yu. Entropy-statistical analysis of refrigeration cycles for "shock" freezing. *Refrigerating equipment*. 2015; 11: 38-42. (In Russ)
20. Patent of the Russian Federation No. 2018125056, No. F25D 11/00 (2006.01); application 10.07.2018 Refrigeration unit for a two-chamber refrigerator / Sumzina L.V., Maksimov A.V., Kudrov Yu.V. // publ. 15.01.2019; 2(In Russ)

Сведения об авторе:

Кудров Юрий Владимирович, старший преподаватель; yurakudrov@yanex.ru

Information about authors:

Yury V. Kudrov, Senior Lecturer, yurakudrov@yanex.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 25.10.2022.

Одобрена после рецензирования/ Revised 17.11.2022.

Принята в печать/Accepted for publication 17.11.2022.

ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА
ENERGY AND ELECTRICAL ENGINEERING

УДК 621.578: 621.565

DOI: 10.21822/2073-6185-2022-49-4-26-34

Оригинальная статья /Original Paper

**Технические решения по вторичному использованию тепловой энергии
и повышению экологической эффективности инженерных систем**
Е.Н. Неверов¹, И.А. Короткий¹, П.С. Коротких¹, М.Ю. Мокрушин¹, А.Н. Порохнов^{1,2}

¹Кемеровский государственный университет,

¹650000, г. Кемерово, ул. Красная, 6, Россия,

²Дом научной коллаборации имени П.А. Чихачева,

²650000, г. Кемерово, пр-т Советский, 73, Россия

Резюме. Цель. В статье предлагаются проектные решения, направленные на комплексную модернизацию системы хладоснабжения ледового дворца «Шайба» в г. Сочи, для снижения её воздействия на экологию. **Метод.** Создана система повторного использования воды и разработана технология использования низкотемпературного тепла, которое выделяется в процессе эксплуатации холодильной машины. **Результат.** Разработана холодильная установка, которая позволяет утилизировать, аккумулировать и направлять теплоту конденсации для вторичного использования тепловой энергии другими инженерными системами на объекте, тем самым позволяет снизить выбросы тепла и парниковых газов в атмосферу Земли и увеличить технологические возможности охлаждения. **Вывод.** Предложенные методики позволяют произвести необходимые расчеты и подобрать оборудование для внедрения разработанных систем на ледовых аренах.

Ключевые слова: холодильная машина; рекуперация тепла; парниковый эффект; теплопередача; охлаждающая жидкость

Благодарности. Работа выполнена в рамках КНТП полного инновационного цикла «Разработка и внедрение комплекса технологий в области разведки и добычи твердых полезных ископаемых, обеспечения промышленной безопасности, биоремедиации, создания новых продуктов глубокой переработки из угольного сырья при последовательном снижении экологической нагрузки на окружающую среду и рисков для жизни населения», распоряжение правительства от 11.05.2022, N1144-р, мероприятие 13 «Инновационная технология очистки сточных вод на предприятиях по добыче угля открытым способом».

Для цитирования: Е.Н. Неверов, И.А. Короткий, П.С. Коротких, М.Ю. Мокрушин, А.Н. Порохнов. Технические решения по вторичному использованию тепловой энергии и повышению экологической эффективности инженерных систем. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022; 49(4):26-34. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-4-26-34

Technical solutions for the recycling of thermal energy and improving the environmental efficiency of engineering systems

E.N.Neverov¹, I.A.Korotkiy¹, P.S.Korotkikh¹, M.Y.Mokrushin¹, A.N.Porokhnov^{1,2}

¹Kemerovo State University,

¹6 Krasnaya Str., Kemerovo 650000, Russia,

² P.A. Chikhachev House of Scientific Collaboration,

²73 Soviet Ave., Kemerovo 650000, Russia

Abstract. Objective. The article proposes design solutions aimed at the comprehensive modernization of the cold supply system of the ice palace "Puck" in Sochi, to reduce its impact on the environment. **Method.** A water reuse system has been created and a technology has been developed for using low-temperature heat that is released during the operation of the refrigeration machine. **Result.**

A refrigeration plant has been developed that allows you to utilize, accumulate and direct the heat of condensation for the secondary use of thermal energy by other engineering systems at the facility, thereby reducing heat and greenhouse gas emissions into the Earth's atmosphere and increasing the technological capabilities of cooling. **Conclusion.** The proposed methods make it possible to make the necessary calculations and select equipment for the implementation of the developed systems in ice arenas.

Keywords: refrigeration machine; heat recovery; greenhouse effect; heat transfer; coolant

Acknowledgment. The work was carried out within the framework of the KSTP of the full innovation cycle "Development and implementation of a set of technologies in the field of exploration and production of solid minerals, ensuring industrial safety, bioremediation, creating new products of deep processing from coal raw materials while consistently reducing the environmental impact on the environment and risks to the life of the population » government order dated 05/11/2022, N1144-r, measure 13 "Innovative technology for wastewater treatment at open-cast coal mining enterprises".

For citation: E.N. Neverov, I.A. Korotkiy, P.S. Korotkikh, M.Y. Mokrushin, A.N. Porokhnov. Technical solutions for the recycling of thermal energy and improving the environmental efficiency of engineering systems. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science. 2022; 49 (4): 26-34. DOI: 10.21822 /2073-6185-2022-49-4-26-34

Введение. Люди привыкли использовать холод для своих нужд, но не все задумываются, что использование искусственного холода наносит вред планете и в основном проявляется в разрушении озонового слоя и парниковом эффекте. Для работы холодильной установки используется хладагент, который сжимается в компрессоре, охлаждается в конденсаторе, расширяется в дроссельном устройстве и испаряется в испарителе. Чтобы получить сжатый газ, приходится сталкиваться с выделением большого количества тепла. Температура газа после сжатия в компрессоре может находиться в широких пределах и достигать 210 °C и выше. Теплота от фреона передается теплоносителю, а он, в свою очередь, за счет теплообмена в конденсаторе отводит теплоту в атмосферу Земли. Также затраты на сжатие требуют много энергии, а, как известно, основным способом ее получения являются тепловые электростанции. В процессе получения энергии на них выделяется очень много углекислого газа, который увеличивает концентрацию в атмосфере. Выброс парниковых газов в окружающую среду, таких как диоксид углерода, метан или водяной пар задерживают инфракрасное излучение от Земли, что в итоге может привести к изменениям климата на Земле [1]. Фреоны, используемые в качестве хладагентов в холодильных установках, приводят к разрушению озонового слоя Земли, так как имеют в своем составе хлор, который, вступая в реакцию, при атмосферных условиях превращает озон в кислород. Исходя из этого, эксперты задаются вопросами, связанными с экологической ситуацией. Все утверждают, что необходимо бережнее относиться к окружающему миру, создавать установки, которые будут соответствовать нормам, но далеко не каждое изобретение можно назвать экологически безопасным. Все холодильные установки, отводя теплоту от охлаждаемого объекта, производят значительное количество тепла, которое передается в атмосферу и, тем самым, не применяется в дальнейшем. Однако использование сбросовой теплоты имеет большой энергетический потенциал, поэтому создание устройств для утилизации тепловой энергии является важнейшей экологической и экономической задачей, решение которой ведется во всех развитых странах мира [2].

Постановка задачи. В последние годы все более актуальным становятся технические решения, позволяющие уменьшить тепловое загрязнение экологии. На различных промышленных предприятиях все чаще ведутся внедрения новых технологий, совершенствуются способы, направленные на вторичное применение энергоресурсов. Применение холодильных установок с утилизацией теплоты актуально, потому что использование утилизации теплоты позволяет сократить выбросы тепла в атмосферу и при этом направить это тепло на использование в других процессах, что в итоге позволит повысить энергоэффективность за счет снижения электроэнер-

гии для этих нужд. Важно отметить, что систему утилизации теплоты можно устанавливать не только на новые установки, но и внедрять на уже запущенные в эксплуатацию [3]. На данный момент бережное обращение с водными ресурсами и переработка воды также в перспективе для многих предприятий, в частности, для ледовых арен, но необходимых систем и готовых решений на рынке существует мало, либо они не затрагивают специфику водопотребления ледовых полей [4].

В дополнение к этому, основное требование, предъявляемое сегодня к хладагентам любых предприятий, использующих искусственный холод – это их экологичность. Переход на современные и озонобезопасные хладагенты является важной задачей в холодильной технике для обеспечения снижения уровня загрязнения планеты.

Методы исследования. В Кемеровском государственном университете совместно с образовательным фондом «Талант и успех» в результате научно-исследовательских и расчетно-аналитических работ была разработана технология утилизации теплоты конденсации систем холодоснабжения ледовых арен и кондиционирования воздуха. В основу этой разработки лег ранее запатентованный прототип парокомпрессионной холодильной установки для эффективной утилизации теплоты конденсации, разработанный кафедрой теплохладотехники. Холодильным агентом является R-507.

Проект выполнен на основе разработки рабочей документации, технического задания заказчика и архитектурно-планировочных чертежей и в соответствии с правилами и нормами по проектированию новых и реконструируемых зданий, сооружений и помещений для различного конькового вида спорта. Положения свода правил распространяются на проектирование ледовых полей с искусственным льдом с замораживаемой (ледяной) поверхностью. А также выполнение проекта предусматривает разработку проектных решений смежных разделов по отоплению, вентиляции воздуха и его кондиционированию, системам теплоснабжения, водоснабжения и канализации с учетом разделов пожарной сигнализации, электроснабжения и силового электро-оборудования, а также действующих на территории РФ норм и правил. В ходе проектировочных работ была проанализирована система хладоснабжения всего ледового дворца, состоящая из четырех винтовых компрессоров CSH 9563-210Y-40D, холодильным агентом которых является R-507. На ее основе была разработана новая принципиальная схема хладоснабжения с учетом различных факторов и возможностью внедрения в нее системы утилизации теплоты [5-6].

В первом разделе было проделано несколько работ по внедрению в существующую холодильную установку ледовой арены системы для утилизации теплоты конденсации и последующее ее использование для технологических нужд. Данный раздел направлен для создания совместной работы систем утилизации теплоты и подготовки воды для заливки льда. Для внедрения системы утилизации в рабочую установку были произведены расчеты согласно разработанной нами методике. Методика включает в себя определение циклов работы холодильной машины, ее параметров, расхода и количества теплоты, которую можно утилизировать с компрессоров, которая также в дальнейшем будет использована для подбора теплообменных аппаратов. Подбор осуществляем по тепловой нагрузке, исходя из полученных расчетов параметров работы холодильной машины [7].

Для выполнения поставленных задач по съему теплоты выбираем пластинчатые трехконтурные теплообменные аппараты AlfaLaval ACH112, которые имеют два контура по фреону и один по воде. Предусматриваем шесть теплообменных аппаратов, устанавливаемых по три штуки на каждую холодильную машину для обеспечения съема теплоты с разных температурных уровней. В целях унификации оборудования на все контуры теплоты выбираем одинаковые теплообменники нагрузкой 200 кВт. Подобранные теплообменные аппараты имеют необходимую площадь теплообменной поверхности и обеспечат требуемый съем теплоты от холодильных машин. Для аккумулирования горячей воды и подачи ее потребителям предусматриваем аккумуляторный бак. Исходя из расчета цикла, количество высокопотенциального тепла от одного компрессора холодильной машины составляет $Q=80$ кВт. Тогда количество отводимой

теплоты для одной холодильной машины системы хладоснабжения арены составит более 320 кВт и позволит обеспечить нагрев воды в объеме 15 м³ на 20 °С (от температуры 45 °С до 65 °С) менее чем за час. Исходя из расчета, были приняты два аккумуляторных бака объемом 7,5 м³ каждый. По полученным данным был сделан вывод, что суммарный принятый объем баков 15 м³ достаточен для обеспечения горячей водой всех потребителей. Использование двух баков, вместо одного, позволяет обеспечить более стабильное и равномерное снабжение потребителей. На рис. 1 представлена схема узла системы утилизации теплоты, состоящая из теплообменных аппаратов, аккумуляторных баков, насосов и запорно-регулирующей арматуры.

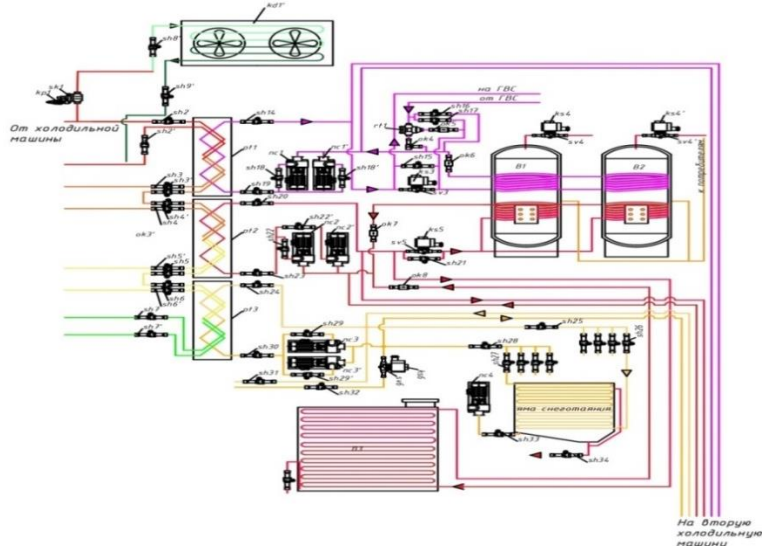


Рис 1. Узел системы утилизации теплоты

Fig. 1. Node of the heat recovery system

Снятие среднетемпературной сбросовой теплоты от хладагента в теплообменном аппарате для аккумулирования теплоты посредством нагрева воды в трех баках позволит утилизировать 212 кВт теплоты и снизить потребление энергии, затрачиваемой на нагрев воды для заливки ледового покрытия. При этом обеспечивается нагрев воды от 20 °С до 40 °С. Для приема избытка этиленгликоля, который образуется при тепловом расширении жидкости необходимо предусмотреть расширительные баки. Данное оборудование необходимо, чтобы свойства теплоносителя не отражались на работоспособности системы утилизации и для предотвращения проблем связанных с разрывом трубопроводов и других элементов. В данной установке были приняты пять расширительных баков объемом 1500 литров. Для повышения энергетической и экологической эффективности ледовой арены, разработанный проект предполагает повторное использование воды, получаемой в результате срезания льда при работе льдозаливочных комбайнов для заливки льда.

Во время работы был спроектирован чертеж ямы снеготаяния и была разработана методика для ее конструктивного и теплового расчета, которая позволяет повторно использовать талую воду в технологическом цикле [8-9]. Методика позволяет подобрать вспомогательное оборудование и рассчитать требуемые конструктивные размеры для применения сбросового тепла для оттапливания ямы. Предполагается повторное использование воды, получаемой в результате срезания льда при работе ресурсейсеров.

Полученная вода будет использоваться для заливки льда. Таяние ледяной крошки происходит в яме снеготаяния сбросовым низкопотенциальным теплом, снятым системой утилизации от холодильных машин в количестве 318 кВт. Этого тепла хватит, чтобы растопить около трех кубометров ледяной стружки, после чего нагреть полученную воду до 20 °С. Также предусмотрена система дополнительной фильтрации и водоподготовки, показанная на рис. 2, что позволит повторно использовать талую воду в технологическом цикле, что позволит значительно снизить затраты на водоотведение. Принцип работы узлов систем утилизации теплоты и повторного использования воды согласно внесенным изменениям следующий: в первом из трех

пластинчатом теплообменном аппарате (pt1) происходит снятие высокопотенциальной теплоты от компрессоров холодильной машины.

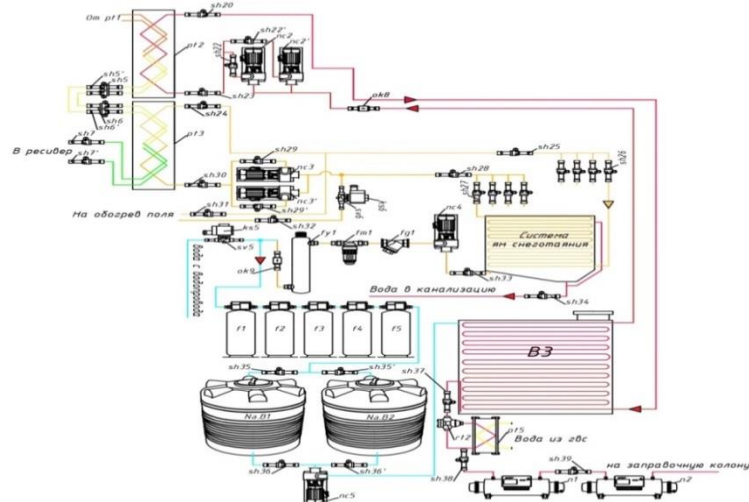


Рис. 2. Узел повторного использования воды

Fig. 2. Water Reuse node

Отведенная высокопотенциальная теплота теплоносителем от фреона подается через шаровой вентиль (sh14) на теплообменный аппарат для горячего водоснабжения и направляется в тепловой пункт, а при срабатывании соленоида (sv4) с катушкой (ks4) теплота подается в первую секцию аккумуляторных баков (Ак.В1, Ак.В2), чтобы нагреть воду. Оставшаяся теплота после теплообмена с теплообменником горячего водоснабжения через регулятор температуры (rt1) смешивается с потоком высокопотенциальной теплоты, проходя через обратный клапан (ok5), исключая обратный ход жидкости, а идущая из теплообменника теплота подается на подогрев в баки, либо отправляется через обратный клапан (ok4), минуя их в зависимости от температуры теплоносителя. Регулирование количества поступающей теплоты осуществляется в автоматическом режиме с помощью соленоидов, но также на схеме предусмотрены шаровые вентили (sh16, sh17), чтобы была возможность изменить режим работы вручную.

После теплообмена в аккумуляторных баках теплоноситель через обратный клапан (ok6) подается насосами (nc1 и nc1') назад в теплообменник первой ступени (pt1), образуя замкнутый независимый контур. Свежая вода поступает в баки из городского водопровода при открытии соленоида (sv5, sv5') с катушкой (ks5, ks5') с температурой от 15 до 20 градусов, нагревается до 60 градусов и направляется на отопление, подогрев системы кондиционирования воздуха и другим потребителям тепловой энергии.

Во втором теплообменнике (pt2) происходит снятие среднетенциальной теплоты. Отведенная среднетенциальная теплота теплоносителем от фреона подается в бак водоподготовки (В3), необходимый для заправки ледозаливочных машин, а при открытии соленоида (sv6) катушкой (ks6) тепло используется для нагрева воды во второй секции аккумуляторных баков (В1, В2). После теплообмена во всех аккумуляторных баках теплоноситель через обратные клапана (ok7, ok8) подается насосами (nc2 и nc2') назад в теплообменник второй ступени, образуя второй замкнутый независимый контур циркуляции тепла от холодильной машины в аккумуляторный бак. Оставшаяся низкотенциальная теплота отводится теплообменником (pt3) и, проходя шаровой вентиль (sh31), подается на обогрев ледового поля либо через шаровой вентиль (sh25) подает теплоту в яму снеготаяния. В основном низкотенциальная теплота используется для обогрева ямы снеготаяния. Отведенная теплота от фреона поступает через входной коллектор (sh26) на четыре змеевиковых теплообменника в яме снеготаяния, где используется для плавления льда, который срезает с поля и скидывает в яму ледозаливочная машина, а также для последующего нагрева этой воды. Отдав свою теплоту, теплоноситель через выходной коллектор (sh27) и шаровой вентиль (sh28) откачивается с помощью насосов (nc3 и nc3') и подается обратно в промежуточный теплообменник, образуя третий независимый контур циркуляции

теплоты. Также коллектора могут использоваться для регулирования подачи необходимого количества тепла в яму снеготаяния путем отключения одного или нескольких змеевиковых теплообменных аппаратов.

После того, как вода в яме достигнет порядка 20 градусов, то она откачивается из ямы насосом (nc4) на фильтрацию через трубопровод, который установлен на 2/3 глубины ямы, чтобы исключить большое попадание загрязнений, которые оседают на дне. Перед основной фильтрацией вода проходит фильтры грубой (fg1) и тонкой механической очистки (fm1), а также ультрафиолетовый фильтр (fy1), затем эта вода из ямы снеготаяния через обратный клапан (ok9) соединяется с трубопроводом центрального водоснабжения, вода из которого подается при открытии соленоида (sv8) с катушкой (ks8), и направляется в систему водоподготовки через осадочные, ионообменные фильтры и установку обратного осмоса (f1, f2, f3, f4, f5), установленные последовательно, где полностью очищается. После фильтрации подготовленная вода с температурой порядка 20 градусов через шаровые вентили (sh35, sh35') поступает в два накопительных бака (Na.B1, Na.B2) объемом 3 м³ каждый, создавая необходимый запас воды. Из накопительных баков вода при открытых шаровых вентилях (sh36, sh36') подается насосом (nc5) в аккумуляторный бак для подготовленной воды (B3) объемом 3 м³, где догревается до температуры 60 градусов при помощи второго контура циркуляции теплоты от холодильной машины, и может использоваться в технологическом процессе для заправки ресурфейсеров. Если вода не достигает требуемой температуры, то она, проходя регулятор температуры (rt1), догревается при помощи пластинчатого теплообменника (pt5), в котором циркулирует вода из горячего водоснабжения, или минует его, если температура воды 60 градусов. Далее поступает через шаровой вентиль (sh38) в электрические водонагреватели (n1, n2), которые включаются и догревают воду, если она менее 60 градусов, до нужной температуры, затрачивая электроэнергию. Не остался без внимания и вопрос обогрева плиты ледового поля, контур низкотемпературной теплоты был врезан в существующую систему обогрева поля, тем самым заменил собой горячее отопление. Обогрев поля предназначен для предотвращения промерзания грунта либо для оттайки ледового покрытия, соответственно, его применение будет во время отсутствия заливки льда, тем самым это не повлияет на эффективность таяния ледовой стружки в яме снеготаяния [13-17].

Обсуждение результатов. На основании выполненных расчетов были приняты проектные решения и произведена разработка рабочей документации на устройство систем утилизации теплоты конденсации и подобрано необходимое оборудование. После этого с учетом всех изменений и нововведений на рабочие чертежи планировки здания было нанесено оборудование, необходимое для внедрения системы утилизации в рабочую установку: теплообменных аппаратов требуемой производительности, аккумуляторных баков, бака водоподготовки, насосов, фильтров грубой и тонкой очистки, ультрафиолетового фильтра и запорно-регулирующей арматуры. Была произведена доработка плана компрессорного цеха. Данные материалы о проделанных работах вошли в рабочую документацию проекта в качестве чертежей и пояснительной записки. После проектирования был произведен гидравлический расчет новых и измененных контуров, который позволил определить потери давления в трубопроводе при перемещении жидкости на расстояние, определить оптимальные диаметры трубопроводов и выбрать мощность насосов. Данные этих расчетов позволяют исключить дефицит мощности, запланировать устройство рационального распределения тепла и сэкономить на материалах для монтажа трубопровода.

Таким образом, проектирование и расчет трубопроводов позволил оптимизировать отопительную систему по конструктивности и затратам. На этапе проектирования вентиляции и кондиционирования осуществлен подбор для имеющихся вентиляционных установок теплообменных аппаратов, которые будут способствовать повышению энергоэффективности арены, что приведет к более рациональному потреблению электроэнергии и позволит распределять утилизируемую теплоту от холодильных машин ледового поля на все здание. Это приведет к улуч-

шению климата в помещениях здания. На данный момент на ледовом поле периодически происходит туманообразование, что приводит к ухудшению видимости и снижению климатического комфорта пребывания людей на арене. Для решения технической задачи был подобран 31 стандартный теплообменный аппарат. Данные аппараты будут размещены в подвале, на первом, на втором и на третьем этажах путем внедрения в действующую приточную систему вентиляции после существующих агрегатов согласно техническому заданию. От каждого внедренного теплообменного аппарата предусмотрен отвод конденсата. Конденсат может быть собран в дренажном ресивере для дальнейшего использования для технологических целей, что также приводит к уменьшению водопотребления и канализирования. Также в схему холодильной машины системы кондиционирования внедрен по такой же методике один трехконтурный теплообменный аппарат для снятия теплоты конденсации и подачи ее на тепловой пункт.

Для повышения уровня эффективности, мобильности, повышение оптимизации производственного процесса и освобождения сотрудников от выполнения трудоемких операций вручную была произведена комплексная автоматизация холодильной установки согласно принятым решениям по изменению условий ее работы вследствие модернизации. В системе предусмотрена комплексная автоматизация холодильных машин ледового поля и системы кондиционирования, охватывающая все задачи по контролю, управлению и защите. Помимо этого, разработанная система позволяет рационально использовать воду на объекте, автоматически заполняя баки водой из ямы снеготаяния или водопровода, что позволяет постоянно поддерживать аккумулированное тепло, тем самым сглаживая неравномерности подачи его потребителям. Выполнены все условия интеграции в существующую систему SCADA SimensDesigoInsight 4.1.

Проект и разработка документации производились в соответствии с техническим заданием на проектирование, действующими нормами, правилами и Государственными стандартами РФ. Заложенные в проект решения предусматривают безопасную эксплуатацию системы холодоснабжения при соблюдении действующих межотраслевых правил по охране труда при эксплуатации фреоновых холодильных установок ПОТ РМ 015-2000 [10-12; 18-20].

Анализ состояния ледовой арены в Сочи и изучение проблем, связанных с ее эксплуатацией, позволил предложить основания для модернизации системы хладоснабжения ледового комплекса. Во время работы были разработаны две методики, одна из которых позволяет произвести расчет для системы утилизации теплоты, а другая сделать тепловой и конструктивный расчет ямы снеготаяния необходимой производительности в зависимости от имеющегося сбросового тепла ледового объекта.

Предложенная модернизация холодоснабжения ледовой арены направлена на снижение зависимости инженерных и технологических систем объектов от городских систем отопления и городского водоснабжения. Кроме того, разработанная технология позволит значительно снизить тепловую нагрузку на конденсаторы системы холодоснабжения арены с помощью внедренных промежуточных теплообменников и позволит исключить расход воды, которая используется на данный момент для орошения воздушных конденсаторов для снижения давления конденсации и предотвращения аварийной остановки холодильных машин ледовой арены. Также холодильная машина оснащена возможностью полностью или частично отключать конденсатор из системы при помощи трехходового вентиля, перенаправляя весь поток теплоты, что позволяет полностью минимизировать выбросы тепловой энергии в атмосферу. Холодильная машина позволяет при помощи трехходовых вентилях переключать теплообменники для обеспечения различной температуры конденсации в конденсаторе, тем самым регулируя холодопроизводительность установки в целом. Холодильная машина работает на озонобезопасных фреонах, которые не содержат атомы хлора, что сводит к минимуму потенциал ODP и GWP. Данная установка является экологически чистой, соответствует всем современным требованиям и нормам, снижает концентрацию выбросов тепла и способствует минимизации разрушения озонового слоя и создания парникового эффекта. Установка обеспечивает объект не только искусствен-

ным холодом, но и позволяет использовать выделившееся тепло для различных технологических нужд предприятия, что ведет к значительной экономии в целом. Также проект охватывает области водоотведения и канализирования путем аккумулирования и повторного использования воды. Таким образом, применяя данные решения, уменьшается водопотребление и значительно снижается имеющийся сброс сточных вод, который производит, такой водоемкий объект, как ледовый дворец.

Вывод. Разработана технология повторного использования воды и система утилизации теплоты конденсации. Полученные разработки вошли в проект для ледовой арены «Шайба», которые предполагают создание совместной работы систем утилизации теплоты и подготовки воды для заливки льда.

На основании выполненных расчетов были приняты проектные решения и произведен подбор оборудования на устройство систем утилизации теплоты конденсации и повторного использования воды. Снятие теплоты от холодильных машин позволит в полной мере обеспечить обогрев ямы снеготаяния для плавления льда, а также позволит аккумулировать тепло посредством нагрева воды в установленных баках аккумуляторов. В дополнение к перечисленным мероприятиям, направленным на улучшение энергетических показателей и показателей ресурсоемкости эксплуатации ледовых арен, были комплексно автоматизированы предлагаемые системы и создана рабочая документация. Спроектированная система хладоснабжения обеспечивает утилизацию и транспортировку теплоты различным потребителям тепловой энергии, что повышает энергоэффективность холодильной машины за счет снятия теплоты с теплообменных аппаратов, а также снижает загрязнение окружающей среды в процессе эксплуатации.

Библиографический список:

1. Денисов-Винский Н. Д. Тепло компрессорных установок // МегаПаскаль. 2011. №2. С. 8–16.
2. Бучин С.С., Смагин. Системы утилизации тепла в холодильных установках. Мир климата. 2010. № 62. С.74–77.
3. Пинчук О. А., Костко А. Ф., Караван С. В. Комплексная водоподготовка в малых водооборотных системах охлаждения // Вестник Международной академии холода. 2020. № 3. С. 3–9.
4. Neverov E.N. The project solution of the refrigeration machine scheme with the heat utilization of condensation / E.N. Neverov, I.A. Korotkiy, M Y Mokrushin, I A Prib, D I Goleshov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. V. 941. P. 012055.
5. Короткий И.А. Разработка схемы системы утилизации теплоты конденсации холодильных машин для снижения зависимости ледовой арены от городских систем отопления и горячего водоснабжения / И.А. Короткий, Е.Н. Неверов, П.С. Коротких, В.Г. Лоншаков // Вестник международной академии холода. 2020. №1. С. 34–39.
6. Бондаревич Е. Мониторинг уровня загрязнения атмосферы по накоплению химических элементов в талой воде снежного покрова / Е. Бондаревич, Н. Коцюржинская, О. Лескова, Л. Михайлова, Г. Самойленко // Экология и промышленность России. 2021;25(8):47-53.
7. Короткий И.А., Е.Н. Неверов, И.А. Приб, М.Ю. Мокрушин, Д.И. Голешов, В.Г. Лоншаков. Проектное решение схемы холодильной машины с утилизацией теплоты конденсации. Холодильная Техника. 2020. №6. С. 30-33.
8. СП 31-112-2007. Часть 3. Крытые ледовые арены. Введ. 2007-24-12. М.: Система нормативных документов в строительстве. 2007. 156 с.
9. СНиП 41-01-2003. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. М.: Госстрой России, 2003.
10. СП 131.13330.2012. Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99. (2013-01-01).
11. Guan B. Regeneration energy analysis on desiccant wheel system in curling arena for the Winter Olympics / B.Guan, X. Liu, X. Wang, T. Zhang, Zhou Z.(2022) Building and Environment, 214, статья № 108960, . 2-s2.0-85125723557
12. Tu R., J. Li, Y. Hwang. Performance analysis of desiccant wheels assisted fresh air humidifiers in winter using natural gas boilers: Applied in cold and dry climate regions. International Journal of Refrigeration, 2020; 119: 24-36.
13. Caliskan H. Enhanced thermodynamic assessments of the novel desiccant air cooling system for sustainable energy future / H. Caliskan, D. Lee, H. Hong // (2019) Journal of Cleaner Production, 211, pp. 213-221.
14. Данилов-Данильян В. Методология достоверной оценки качества воды. III. Оценка качества пресной воды в условиях непостоянства контролируемых показателей. / В. Данилов-Данильян, О. Розенталь // Экология и промышленность России. 2022;26(5):44-49.
15. Shakirova G. G. Modern Innovations: Fundamental and Applied Research no 1, S.V. Valtsev, A.S. Kotlova et al (Moskva: ООО «Olimp») 2015. vol 1. pp 6-7.
16. Israphilov D I and Mukhamatdinov I A 2017 Science Yesterday, Today, Tomorrow vol 8 no 42, ed M A Vasinovich, N V Dmitrieva et al (Novosibirsk: ANS «SibAk») pp 58-62.
17. Baranenko A V, Bukharin N N, Pekarev V I, Sakun I A and Timofeevsky L S 1997 Refrigeration Machines (St. Petersburg: Polytechnic) p 499.
18. Neverov E N, Korotky I A, Raschepkin A N and Ibragimov M I 2020 Bulletin of the International Academy of Refrigeration 1(74) pp 22-6.
19. Belsky Y D 2012 Modern Society, Education and Science (Tambov: ООО "Consulting company Ucom") pp 16-7.
20. Neverov E N, Korotkiy I A, Korotkih P S, Lifenceva L V et al 2019 IOP Conf. Series: Earth Environ. Science 224 012039.

References:

1. Denisov-Vinsky N.D. Heat compressor units. *MegaPascal*. 2011. No. 2. pp. 8-16. (In Russ)
2. Buchin S., S. Smagin. Heat recovery systems in refrigeration units. *The world of climate*. 2010; 62:74-77. (In Russ)
3. Pinchuk O.A., Kostko A.F., Karavan S.V. Complexate water treatment in small water circulation cooling systems. *Bulletin of the International Academy of Cold*. 2020; 3: 3-9. (In Russ)
4. Neverov E.N., Korotkiy, M.Y. Mokrushin, I.A. Prib, D.I. Goleshov. The project solution of the refrigeration machine scheme with the heat utilization of condensation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;941: 012055.
5. Korotkiy I.A. Development of refrigerating machines condensation for heat recovery scheme to reduce the dependence of the ice arena on urban heating and hot water supply systems / I.A. Korotkiy, E.N. Neverov, P.S. Korotkiy, V.G. Lonshakov. *Bulletin of the International Academy of Refrigeration*. 2020; 1:34-39. (In Russ)
6. Bondarevich E. Monitoring of the level of atmospheric pollution due to accumulation of chemical elements in snowmelt water / E. Bondarevich, N. Kotsyurzhinskaya, O. Leskova, L. Mikhailova, G. Samoylenko. *Ecology and Industry of Russia*. 2021; 25(8):47-53. (In Russ)
7. Korotkiy, I.A. Design solution to the scheme of a refrigerating machine with condensation heat utilization / I.A. Korotkiy, E.N. Neverov, I.A. Prib, M.Yu. Mokrushin, D.I. Goleshov, V.G. Lonshakov. *Refrigerating Equipment*. 2020; 6: 30-33. (In Russ)
8. Set of rules SP 31 112 2007. Part 3. Indoor ice arenas. Introduction. 2007 24 12. M.: *System of regulatory documents in construction*. 2007. 156 p. (In Russ)
9. Sanitary norms and rules SNiP 41012003. Heating, ventilation and air conditioning. Moscow: *Gosstroy of Russia*, 2003. (In Russ)
10. Set of rules SP 131.13330.2012. Construction climatology. Updated version of sanitary norms and rules SNiP 23 01 99. Date of implementation 2013 01 01. (In Russ)
11. Guan B. Regeneration energy analysis on desiccant wheel system in curling arena for the Winter Olympics / B.Guan, X. Liu, X. Wang, T. Zhang, Z. Zhou. *Building and Environment*, 2022; 214, paper № 108960, 2-s2.0-85125723557
12. Tu R., J. Li, Y. Hwang. Performance analysis of desiccant wheels assisted fresh air humidifiers in winter using natural gas boilers: Applied in cold and dry climate regions. *International Journal of Refrigeration*, 2020; 119: 24-36.
13. Caliskan H. Enhanced thermodynamic assessments of the novel desiccant air cooling system for sustainable energy future / H. Caliskan, D. Lee, H. Hong. *Journal of Cleaner Production*, 2019; 211: 213-221.
14. Danilov-Danilyan V., O. Rosenthal. Methodology of water quality reliable assessment. III. Assessment of fresh water quality under conditions of controlled indicators variability. *Ecology and industry of Russia*. 2022;26(5):44-49. (In Russ)
15. Shakirova G. G. Modern Innovations: Fundamental and Applied Research no 1, S.V. Valtsev, A.S. Kotlova et al (Moskva: ООО «Олимп») 2015; 1(1):6-7.
16. Israphilov D. I. and Mukhamatdinov I. A. Science Yesterday, Today, Tomorrow, ed M A Vasinovich, N V Dmitrieva et al (Novosibirsk: ANS «SibAk») 2017; 8(42): 58-62.
17. Baranenko A V, Bukharin N N, Pekarev V I, Sakun I A and Timofeevsky L S 1997 Refrigeration Machines (St. Petersburg: Polytechnic) p 499.
18. Neverov E N, Korotkiy I A, Raschepkin A N and Ibragimov M I *Bulletin of the International Academy of Refrigeration* 2020;1(74): 22-6.
19. Belsky Y. D. Modern Society, Education and Science (Tambov: ООО "Consulting company Ucom")2012; 16-7.
20. Neverov E N, Korotkiy I A, Korotkiy P S, Lifenceva L V et al 2019 IOP Conf. Series: Earth Environ. Science 224 012039.

Сведения об авторах:

Неверов Евгений Николаевич, доктор технических наук, профессор, зав.каф.техносферной безопасности; neverov42@mail.ru

Короткий Игорь Алексеевич, доктор технических наук, профессор, зав.каф.теплохладотехники; krot69@mail.ru

Коротких Павел Сергеевич, старший преподаватель кафедры теплохладотехники, korotkix42@gmail.com

Мокрушин Максим Юрьевич, магистрант кафедры теплохладотехники, mokrushin99@list.ru

Порохнов Андрей Николаевич, директор, porohnov@yandex.ru

Information about authors:

Evgeny N. Neverov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department of Technosphere Security, neverov42@mail.ru

Igor A. Korotkiy, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department of Heat and Cooling Engineering, krot69@mail.ru

Pavel S. Korotkiy, Senior Lecturer of the Department of Heat and Cooling Engineering, korotkix42@gmail.com

Maxim Y. Mokrushin, Master's student of the Department of Heat and Cooling Engineering, mokrushin99@list.ru

Andrey N. Porokhnov, Director; porohnov@yandex.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 05.10.2022.

Одобрена после рецензирования/ Revised 27.10.2022.

Принята в печать/Accepted for publication 27.10.2022.

ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА
ENERGY AND ELECTRICAL ENGINEERING

УДК 621.3

DOI: 10.21822/2073-6185-2022-49-4-35-44

Оригинальная статья /Original Paper

Моделирование температурного поля при тепловом воздействии на передний отрезок
глазного яблока человека

Ш.А. Юсуфов¹, Т.Э. Саркаров¹, Д.А. Магомедов¹, Д.В. Евдулов¹, П.Н. Суракатова²

¹Дагестанский государственный технический университет,
367026, г. Махачкала, пр. И. Шамиля, 70, Россия

²Дагестанский государственный медицинский университет,
367012, г. Махачкала, пл. Ленина, 1, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является разработка модели для определения температурного поля глазного яблока человека при тепловом воздействии на его передний отрезок. **Метод.** Разработана модель для определения температурного поля глазного яблока человека при воздействии на его передний отрезок. **Результат.** Получены зависимости температур характерных точек внутри глазного яблока от времени при циклическом воздействии тепловым потоком на его передний отрезок, а также графики распределения температуры вдоль оптической оси глазного яблока при приложении теплового потока. **Вывод.** Разработанная модель позволяет учитывать теплофизические характеристики всех основных структур глаза человека, а также показывает эффективность проведения температурного массажа цилиарного тела и хрусталика.

Ключевые слова: термоэлектрическое устройство, глазное яблоко человека, тепловое воздействие, математическая модель, численный эксперимент, температура

Для цитирования: Ш.А. Юсуфов, Т.Э. Саркаров, Д.А. Магомедов, Д.В. Евдулов, П.Н. Суракатова. Моделирование температурного поля при тепловом воздействии на передний отрезок глазного яблока человека. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022; 49(4):35-44. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-4-35-44

Modeling of the temperature field under thermal action on the anterior segment
of the human eyeball

Sh.A. Yusufov¹, T.E. Sarkarov¹, D.A. Magomedov¹, D.V. Evdulov¹, P.N. Surakatova²

¹Daghestan State Technical University,
170 I. Shamilya Ave., Makhachkala 367026, Russia,

²Daghestan State Medical University,
21 Lenin Square, Makhachkala 367012, Russia

Abstract. Objective. The aim of the study is to develop a mathematical model for determining the temperature field of a human eyeball under thermal influence on its anterior segment. **Method.** A mathematical model has been developed to determine the temperature field of a human eyeball when exposed to its anterior segment. **Result.** The temperature dependences of characteristic points inside the eyeball on time during cyclic exposure to heat flow on the anterior segment are obtained, as well as graphs of temperature distribution along the optical axis of the eyeball when applying heat flow. **Conclusion.** The developed mathematical model allows us to take into account the thermophysical characteristics of all the main structures of the human eye, and also shows the effectiveness of temperature massage of the ciliary body and lens.

Key words: thermoelectric device, human eyeball, thermal effect, mathematical model, numerical experiment, temperature

For citation: Sh.A. Yusufov, T.E. Sarkarov, D.A. Magomedov, D.V. Evdulov, P.N. Surakatova. Modeling of the temperature field under thermal action on the anterior segment of the human eyeball. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science. 2022; 49 (4): 35-44. DOI: 10.21822 /2073-6185-2022-49-4-35-44

Введение. Температура является одним из важных факторов при лечении самых различных офтальмологических заболеваний. Воздействие теплом используется и при заболеваниях роговицы, конъюнктивы, склеры, стекловидного тела, ожогах, воспалительных процессах и др. Теплолечение в глазной практике применяется в целях оказания противовоспалительного, обезболивающего, антиспазматического и рассасывающего действия. В качестве теплолечебных средств используют парафин, озокерит, грязь, песок, припарки, грелки, фен, компрессы и примочки. Парафин обладает крайне малой теплопроводностью (в 10 раз меньше, чем вода), большой теплоемкостью и компрессионным действием. Влияние парафина обусловлено механическим и термическим факторами: сдавление кожи и глубжележащей ткани после охлаждения парафина и тепловым эффектом [2]. Под влиянием парафиновой аппликации улучшается кровообращение и лимфообращение, повышается местный тканевой обмен, усиливается фагоцитарная функция элементов соединительной ткани, быстрее исчезают отеки, ускоряется рассасывание диффузных помутнений стекловидного тела, улучшается питание и трофика кожи (она становится эластичной и нежной). После экстракции хрусталика ускоряется рассасывание его волокон. Парафинолечение показано при заболеваниях сосудистого тракта, кератите, травмах глаза и их последствиях, остеомиелите стенок глазницы, помутнениях стекловидного тела, травматических иридоциклитах, ожогах кожи век, вяло гранулирующих ранах век и др.

Часто вместо парафина используется озокерит (горный воск). Он обладает большей теплоемкостью, чем парафин, но уступает ему в теплопроводности. Озокерит оказывает такие же лечебные действия, как и парафин, а также и химическое. Методика его применения подобна парафинотерапии [7].

В основе физиологического действия грязелечения лежит нервно-рефлекторный механизм. Его эффект обусловлен термическими, физико-химическими и биологическими особенностями грязей. Лечебная грязь, наложенная на определенный сегмент тела, оказывает влияние не только на подлежащие ткани, но и рефлекторно вызывает реакцию со стороны более отдаленных органов и систем. В настоящее время при глазных болезнях грязевые аппликации применяются на область глаза или на рефлексогенную (воротниковую) зону. Назначают грязелечение при хронических воспалительных процессах в веках и слезных органах, хронических кератитах, рецидивирующих иридоциклитах ревматической этиологии, глубоких инфильтратах в глазнице, параличе мышц, рубцовых изменениях придатков глаза, атрофии зрительного нерва и др. В домашних условиях для теплолечения широко применяют водяные, электрические и химические грелки. Наиболее простое и доступное средство теплолечения – грелка из полотняного мешочка, наполненного разогретым на сковороде песком или льняными семенами, отрубями или просом до температуры 50-55°C [3,4,5,20].

Весьма эффективный метод местного лечения влажным теплом. Широко используют также примочки из вяжущих или дезинфицирующих средств и компрессы. Основное лечебное действие компресса – легкое, но длительное согревание тканей, вызванное ограничением теплоотдачи. На область глаза компресс назначают в целях обезболивания, улучшения кровообращения, усиление прилива и оттока крови при местных воспалительных процессах и посттравматических инфильтратах. Дополнительным средством в комплексном лечении многих глазных заболеваний является и массаж. Основные методы массажа в офтальмологии: поглаживание, растирание, разминание и вибрация (сотрясение). В основе действия массажа лежат сложные физико-химические изменения в состоянии клеточных коллоидов. Под влиянием механических раздражений уменьшается дисперсность коллоидов, набухает протоплазма и увеличивается ее вязкость, расширяется капиллярная сеть в тканях, расправляются резервные капилляры, усиливается кровоснабжение, а следовательно и питание ткани, способствующие скорейшему удалению продуктов обмена. Раздражение нервных рецепторов приводит в действие ряд рефлекторных механизмов, обуславливающих терапевтический эффект массажа. Таким образом, массаж тканей глаза повышает тонус нервно-мышечного аппарата, улучшает крово- и лимфообращение, ускоряет рассасывание отеков и инфильтратов, понижает кожную чувствительность и способствует улучшению трофики тканей [9, 19].

Постановка задачи. Тепловое воздействие используется практически во всех терапевтических процедурах. Температурный фактор имеет место и при ультразвуковой терапии, и в электролечении, и при светолечении, водолечении, грязелечении и даже при массаже. Однако

при этом надо отметить отсутствие в офтальмологической практике устройств и аппаратов для локального теплового воздействия. Здесь надо отметить, что необходимо воздействие как высокими, так и умеренно-низкими температурами, так как воздействие низкими температурами не менее важно, чем высокими, а подчас и более эффективно. Традиционно применяемые способы изменения температуры воздействия подразумевают использование примитивных устройств – лампы, грелки, ванночки, примочки и т.д. Все эти приспособления не позволяют осуществить направленное дозированное тепловое воздействие. Недостатком существующих систем можно также считать инерционность протекающих в них тепловых процессов и сложность получения локального теплового воздействия с заданными динамическими характеристиками. Применение ТЭМ, использующих эффект Пельтье [6,16,17], позволяет реализовать различные схемы медицинских устройств для оказания терапевтического воздействия [10,11,13,18].

Целью данной статьи является моделирование температурного поля при тепловом воздействии на передний отрезок глазного яблока человека.

Методы исследования. Для нахождения температурного поля глазного яблока необходимо определиться со структурой глаза и его геометрическими размерами. Задачу упрощает то, что глазное яблоко достигает своих постоянных размеров к десятому году жизни человека, и с этого времени размеры глаз человека не сильно отличаются у разных людей. Для того чтобы геометрически описать глазное яблоко, в первую очередь требуется выбрать систему координат. Для упрощения описания задачи была выбрана цилиндрическая система координат z, r, θ . Это обосновано тем, что в некотором приближении глазное яблоко представляет собой фигуру вращения, ось симметрии которой совпадает с оптической осью. Если ось z провести через оптическую ось глаза, то по координате угла θ свойства всех сред будут постоянными. Это позволяет нам свести задачу к плоскости $z-r$ (точнее полуплоскости $r>0$). Таким образом, мы объемная задача сводится к двумерной, решение которой значительно проще. Структурная схема глазного яблока приведена на рисунке 1.

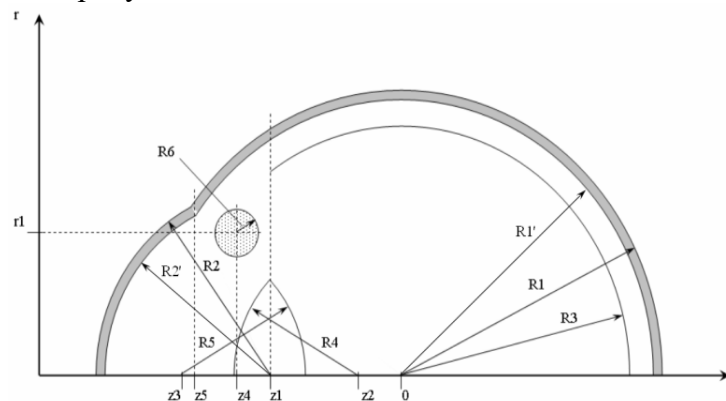


Рис. 1. Структурная схема глазного яблока человека

Fig. 1. Block diagram of the human eyeball

Дифференциальное уравнение теплопроводности в цилиндрической системе координат имеет вид: [1, 15]

$$c_v \rho \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial r} \right) + \frac{\lambda}{r} \frac{\partial t}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial z} \right) + q_v$$

Так как

$$\frac{\partial t}{\partial \theta} = 0 \rightarrow \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial \theta} \right) = 0,$$

то

$$c_v \rho \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial r} \right) + \frac{\lambda}{r} \frac{\partial t}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial z} \right) + q_v \quad (1)$$

Основными составляющими глазного яблока, рассматриваемыми в нашей задаче стали склера, хрусталик, стекловидное тело, цилиарное тело и глазное дно. Эти области нами выбра-

ны в виду того, что ни оказывают наибольшее влияние на распределение температуры внутри глаза. Для описания взаимодействия глаза с окружающими тканями и средой, его поверхность можно условно разделить на две части: передний и задний отрезки. Передний отрезок – это та часть поверхности глаза, которая при максимально открытых веках соприкасается с воздухом окружающей среды. Задний отрезок – остальная поверхность глазного яблока.

Свойства сред глаза описываются усредненными значениями удельной теплоемкости и удельной теплопроводности, а для цилиарного тела и глазного дна необходимо ввести еще значение объемной плотности тепловыделений как для областей, богатых кровеносными сосудами. Чтобы дать полное математическое описание температурного поля глазного яблока, к уравнению (1) надо добавить условия однозначности, которые содержат геометрические, физические, граничные и временные условия.

Глаз представляет собой две совмещенные шаровые фигуры (одна с радиусом 12 мм, другая – 8 мм), где малая выступает из большей на 2.3 мм. Если ось z имеет ноль в центре большей шаровой фигуры, то геометрические условия для всех указанных областей и поверхностей глаза будут выглядеть следующим образом:

Склера

$$\begin{cases} (R1-R1')^2 \leq z^2 + r^2 < R1^2 \text{ для } z \geq z5, \\ (R2-R2')^2 \leq (z-z1)^2 + r^2 < R2^2 \text{ для } z < z5, \\ r > 0 \end{cases}$$

Хрусталик

$$\begin{cases} (z-z2)^2 + r^2 \leq R4^2, \\ (z-z3)^2 + r^2 \leq R5^2, \\ r > 0 \end{cases}$$

Глазное дно

$$\begin{cases} z^2 + r^2 = R3^2, \\ r > 0, \\ z \geq z1 \end{cases}$$

Цилиарное тело

$$(z-z4)^2 + (r-r1)^2 \leq R6^2$$

Передний отрезок

$$\begin{cases} z^2 + r^2 = R1^2 \text{ при } z5 \leq z < z1 \\ (z-z1)^2 + r^2 = R2^2 \text{ при } z < z5 \\ r > 0 \end{cases}$$

Задний отрезок

$$\begin{cases} z^2 + r^2 = R^2 \\ r > 0 \\ z \geq z1 \end{cases}$$

Физические условия, определяющиеся теплофизическими параметрами тела, а также распределением внутренних источников теплоты, для глазного яблока имеют вид:

$$c_v = \begin{cases} c_{vxp}, \text{ при } (z-z2)^2 + r^2 \leq R4^2, (z-z3)^2 + r^2 \leq R5^2, r > 0 \\ c_{vскп}, \text{ при } (R1-R1')^2 \leq z^2 + r^2 < R1^2 \text{ для } z \geq z5, (R2-R2')^2 \leq (z-z1)^2 + r^2 < R2^2 \text{ для } z < z5, r > 0 \\ c_{vст} \text{ в остальных случаях} \end{cases} \quad (2)$$

$$\lambda = \begin{cases} \lambda_{\text{хр}}, \text{ при } (z - z_2)^2 + r^2 \leq R_4^2, (z - z_3)^2 + r^2 \leq R_5^2, r > 0 \\ \lambda_{\text{скл}}, \text{ при } (R_1 - R_1')^2 \leq z^2 + r^2 < R_1^2 \text{ для } z \geq z_5, (R_2 - R_2')^2 \leq (z - z_1)^2 + r^2 < R_2^2 \text{ для } z < z_5, r > 0 \\ \lambda_{\text{ст}} \text{ в остальных случаях} \end{cases} \quad (3)$$

$$\rho = \begin{cases} \rho_{\text{хр}}, \text{ при } (z - z_2)^2 + r^2 \leq R_4^2, (z - z_3)^2 + r^2 \leq R_5^2, r > 0 \\ \rho_{\text{скл}}, \text{ при } (R_1 - R_1')^2 \leq z^2 + r^2 < R_1^2 \text{ для } z \geq z_5, (R_2 - R_2')^2 \leq (z - z_1)^2 + r^2 < R_2^2 \text{ для } z < z_5, r > 0 \\ \rho_{\text{ст}} \text{ в остальных случаях} \end{cases} \quad (4)$$

$$q_v = \begin{cases} q_{v_{\text{ум}}}, \text{ при } (z - z_4)^2 + (r - r_1)^2 \leq R_6^2 \\ q_{v_{\text{зо}}}, \text{ при } z^2 + r^2 = R_3^2, r > 0, z \geq z_1 \end{cases} \quad (5)$$

Граничные условия:

$$\left. \frac{\partial t}{\partial r} \right|_{r=0} = 0 \quad (6)$$

$$t = 310 \text{ K}, z^2 + r^2 = R_3^2, r > 0, z > z_1 \quad (7)$$

$$\lambda \left. \frac{\partial t}{\partial n} \right|_{\substack{z^2 + r^2 = R_1^2 \text{ при } z_5 \leq z < z_1 \\ (z - z_1)^2 + r^2 = R_2^2 \text{ при } z < z_5 \\ r > 0}} = \text{const} \quad (8)$$

где n - нормаль к изотермической поверхности

$$\frac{\partial t}{\partial n} = \frac{\partial t}{\partial r} + \frac{\partial t}{\partial z}$$

Результаты численного эксперимента. На основе предложенной математической модели произведен численный эксперимент. Наиболее оптимальным подходом явился поиск решения с помощью метода конечных элементов [8,12,21]

На рис. 2 приведена структура глаза с наложенной на нее конечноэлементной сеткой. Размер ячейки сетки подбирается исходя из определяющего размера.

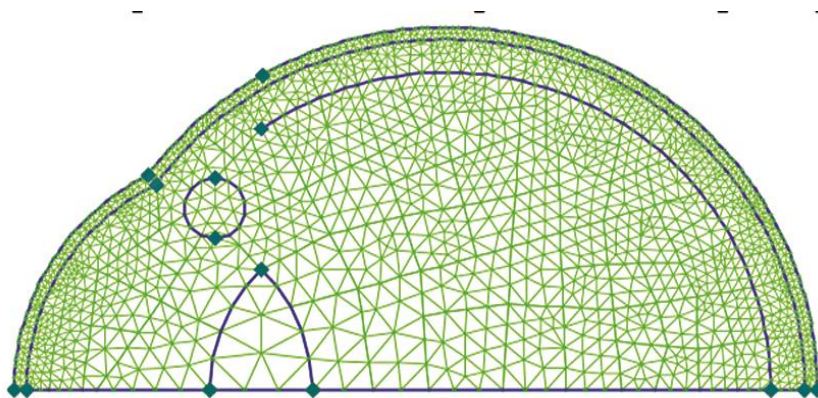


Рис. 2. Структура глазного яблока человека с наложенной конечноэлементной сеткой
 Fig. 2. The structure of the human eyeball with a superimposed finite element mesh

На рис. 3 – 6 представлены результаты расчета стационарной задачи теплопроводности. Так, на рис. 3 показано поле температур глазного яблока человека при приложении к переднему отрезку теплового потока $q = -1000 \text{ Вт/м}^2$, а на рис. 4 – распределение температуры вдоль оптической оси глазного яблока для этого же случая. Как видно из этих рисунков, значение температуры на переднем отрезке при данном тепловом потоке составляет 284 К (температура понизилась на 25 К), но после хрусталика понижение температуры уже не столь ощутимо – всего 4 К.

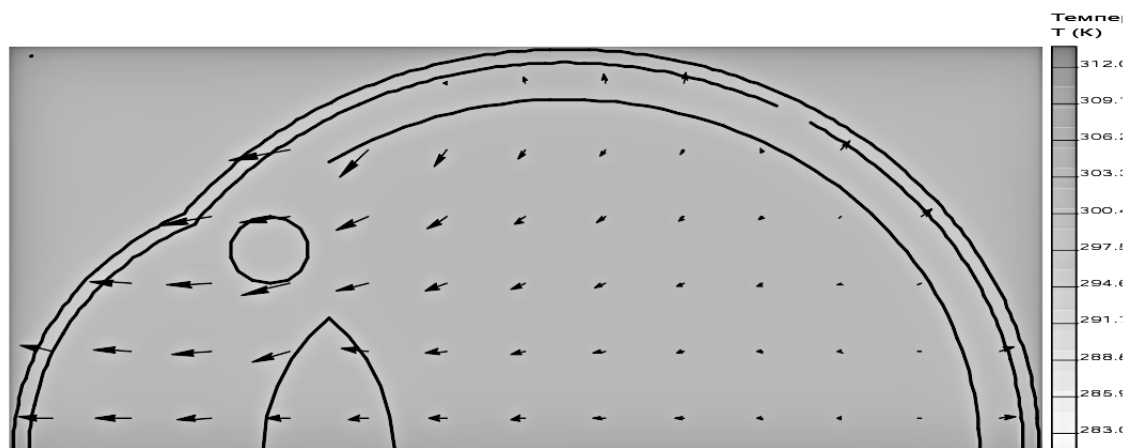


Рис. 3. Температурное поле глазного яблока человека при тепловом потоке на переднем отрезке $q = -1000 \text{ Вт/м}^2$
Fig. 3. Temperature field of the human eyeball with a heat flow in the anterior segment $q = -1000 \text{ W/m}^2$

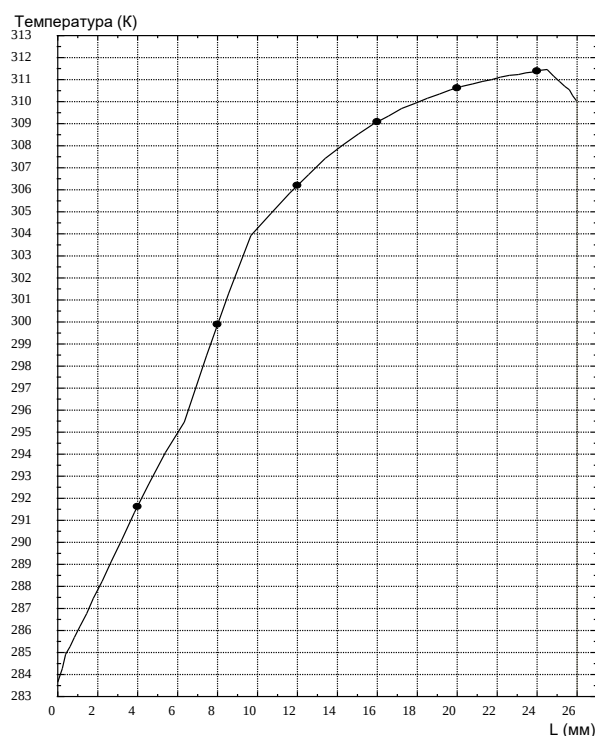


Рис. 4. Распределение температуры вдоль оптической оси глазного яблока человека при тепловом потоке на переднем отрезке $q = -1000 \text{ Вт/м}^2$
Fig. 4. Temperature distribution along the optical axis of the human eyeball with a heat flux in the anterior segment $q = -1000 \text{ W/m}^2$

Рис. 5 и 6 дают представление о температурном поле глаза при приложении к переднему отрезку теплового потока $q = +300 \text{ Вт/м}^2$. Здесь температура склеры у переднего отрезка повысилась до 319 K (46°C). Дальнейшее повышение температуры в реальной терапевтической процедуре чревато тяжелыми последствиями для органа зрения. Распределение температуры по глубине показывает, что температура быстро падает и достигает минимума на глазном дне. На рис. 7 – 10 дано решение нестационарной задачи. Во всех случаях к переднему отрезку глазного яблока прикладывалась циклическая нагрузка, и наблюдалось изменение температуры по времени в характерных точках глазного яблока.

В качестве таких точек выбраны задняя поверхность склеры у переднего отрезка; середина цилиарного тела; середина хрусталика; глазное дно на оптической оси.

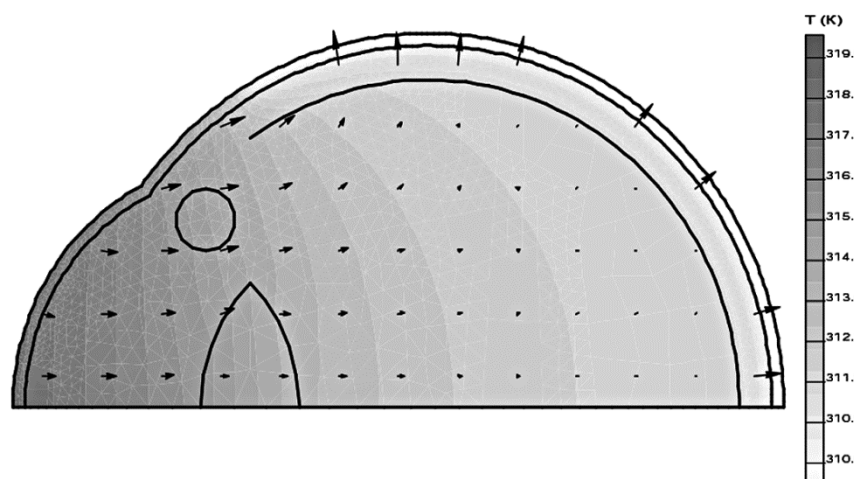


Рис. 5. Температурное поле глазного яблока человека при тепловом потоке на переднем отрезке $q = +300 \text{ Вт/м}^2$
 Fig. 5. Temperature field of the human eyeball with heat flow in the anterior segment $q = +300 \text{ W/m}^2$

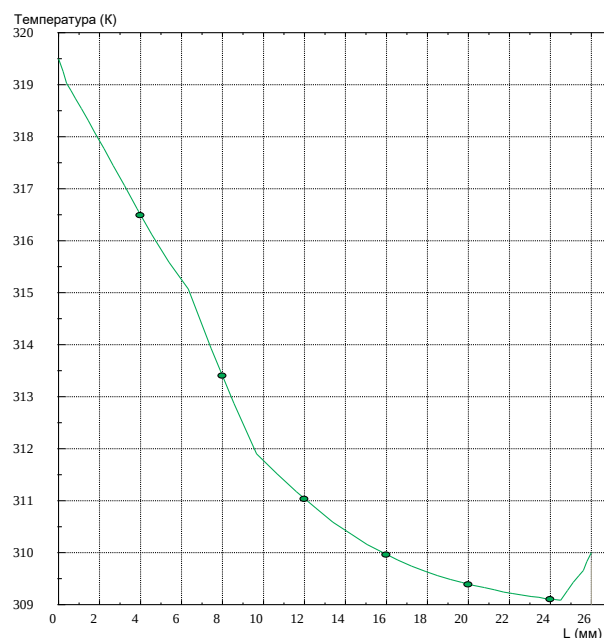


Рис. 6. Распределение температуры вдоль оптической оси глазного яблока человека при тепловом потоке на переднем отрезке $q = +300 \text{ Вт/м}^2$
 Fig. 6. Temperature distribution along the optical axis of the human eyeball with a heat flux in the anterior segment $q = +300 \text{ W/m}^2$

На рис. 7 – 9 бралось циклическое изменение теплового потока, а на рис. 10 – температуры. При анализе этих графиков мы руководствовались тем, что требуется получить максимальные колебания температуры при удержании ее в пределах от $+10^\circ\text{C}$ до $+40^\circ\text{C}$. Так же необходимо достичь максимального изменения температуры в цилиарном теле, как области наиболее богатой кровеносными сосудами и которой необходим температурный массаж в терапевтических целях. Начальным условием для нестационарной задачи, решение которой показано на рис. 7 являлось поле температур, представленное на рис. 5. Здесь мы видим, что температура переднего отрезка глазного яблока колеблется в неудовлетворяющих нас границах, т.е. верхняя температура слишком высокая ($+48^\circ\text{C}$) а нижняя – недостаточно низкая ($+28^\circ\text{C}$).

Следовательно, надо уменьшить положительное значение теплового потока и увеличить отрицательное. Начальным условием для нестационарной задачи, решение которой показано на рис.8 являлось поле температур, представленное на рис. 3. Здесь мы наблюдаем обратный случай: верхняя температура переднего отрезка глазного яблока недостаточно высокая ($+31^\circ\text{C}$), но нижняя нас вполне устраивает

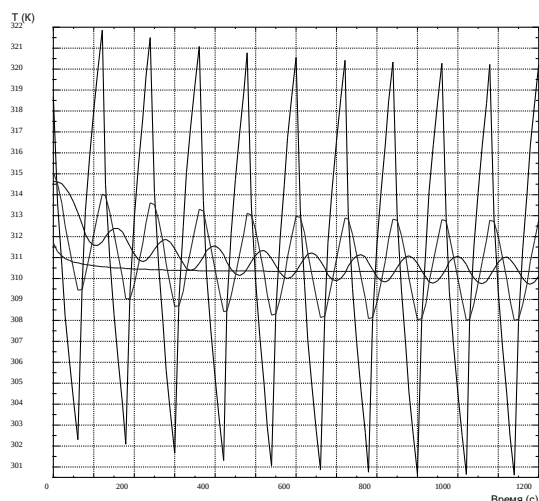


Рис. 7. Зависимость температур характерных точек внутри глазного яблока от времени при циклическом воздействии тепловым потоком на передний отрезок (60 секунд $q = -1500 \text{ Вт/м}^2$, 60 секунд $q = +1500 \text{ Вт/м}^2$)

1 – передний отрезок (внутренняя граница склеры); 2 – середина хрусталика; 3 – середина цилиарного тела; 4 – глазное дно

Fig. 7. Dependence of temperatures of characteristic points inside the eyeball on time under cyclic exposure to heat flow on the anterior segment (60 seconds $q = -1500 \text{ W/m}^2$, 60 seconds $q = +1500 \text{ W/m}^2$)

1 - anterior segment (inner border of the sclera); 2 - the middle of the lens; 3 - the middle of the ciliary body; 4 - fundus

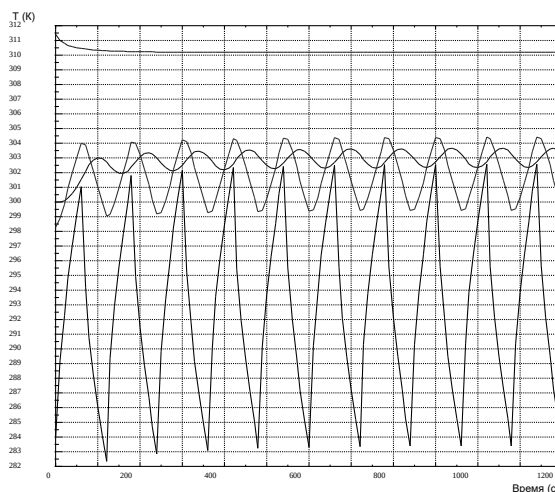


Рис. 8. Зависимость температур характерных точек внутри глазного яблока от времени при циклическом воздействии тепловым потоком на передний отрезок (60 секунд $q = +1000 \text{ Вт/м}^2$, 60 секунд $q = -2000 \text{ Вт/м}^2$)

1 – передний отрезок (внутренняя граница склеры); 2 – середина хрусталика; 3 – середина цилиарного тела; 4 – глазное дно

Fig. 8. Dependence of temperatures of characteristic points inside the eyeball on time under cyclic exposure to heat flow on the anterior segment (60 seconds $q = +1000 \text{ W/m}^2$, 60 seconds $q = -2000 \text{ W/m}^2$)

1 - anterior segment (inner border of the sclera); 2 - the middle of the lens; 3 - the middle of the ciliary body; 4 - fundus

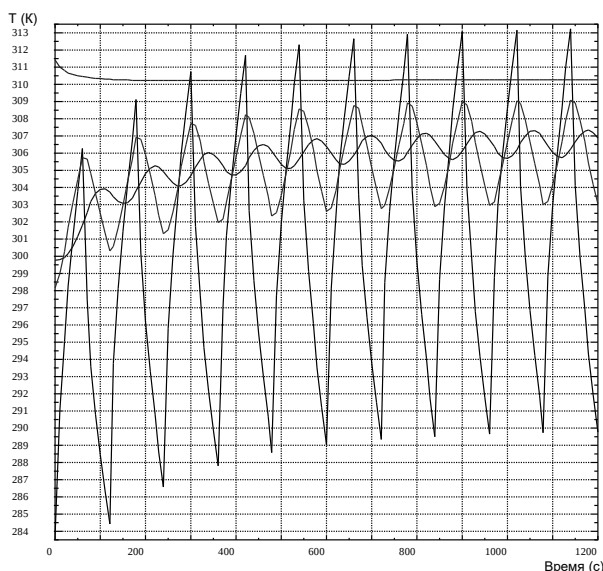


Рис. 9. Зависимость температур характерных точек внутри глазного яблока от времени при циклическом воздействии тепловым потоком на передний отрезок (60 секунд $q = +1500 \text{ Вт/м}^2$, 60 секунд $q = -2000 \text{ Вт/м}^2$) 1 – передний отрезок (внутренняя граница склеры); 2 – середина хрусталика; 3 – середина цилиарного тела; 4 – глазное дно

Fig. 9. Dependence of temperatures of characteristic points inside the eyeball on time under cyclic exposure to heat flow on the anterior segment (60 seconds $q = +1500 \text{ W/m}^2$, 60 seconds $q = -2000 \text{ W/m}^2$) 1 - anterior segment (inner border of the sclera); 2 - the middle of the lens; 3 - the middle of the ciliary body; 4 - fundus

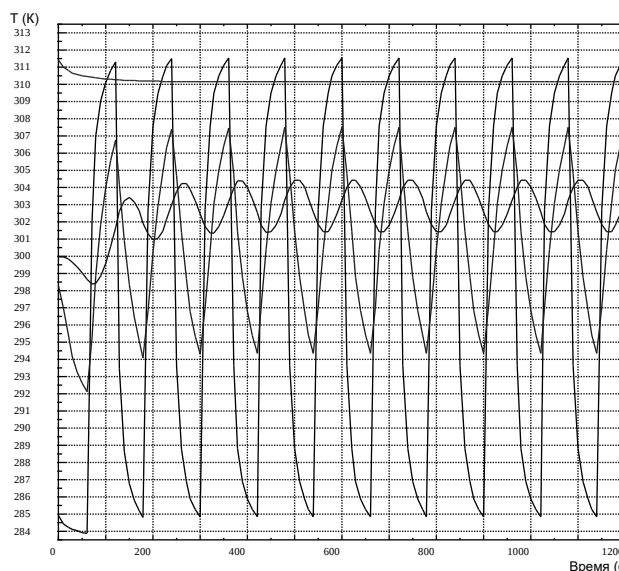


Рис. 10. Зависимость температур характерных точек внутри глазного яблока от времени при циклическом воздействии тепловым потоком на передний отрезок (60 секунд $T = 283 \text{ K}$, 60 секунд $T = 313 \text{ K}$) 1 – передний отрезок (внутренняя граница склеры); 2 – середина хрусталика; 3 – середина цилиарного тела; 4 – глазное дно

Fig. 10. Dependence of temperatures of characteristic points inside the eyeball on time under cyclic exposure to heat flow on the anterior segment (60 seconds $T = 283 \text{ K}$, 60 seconds $T = 313 \text{ K}$) 1 - anterior segment (inner border of the sclera); 2 - the middle of the lens; 3 - the middle of the ciliary body; 4 - fundus

Значит, надо увеличить положительное значение теплового потока и оставить неизменным начальное условие. Реализация этого предположения представлена на рис. 9. Как мы видим, температура всех точек колеблется в требуемых нами пределах, однако процесс стабилизируется только через 800 секунд от начала циклического воздействия.

На рис. 10 показано временное изменение температур тех же точек при циклическом изменении температуры переднего отрезка глазного яблока (60 секунд температура переднего отрезка составляет 283 К, 60 секунд - 313 К). Здесь процесс стабилизируется практически через 100 секунд, размах температур максимален и находится в требуемых пределах. Изменение температуры цилиарного тела для этого случая максимально (диапазон изменения температуры составляет 15 °С).

Вывод. Анализируя полученные зависимости можно сделать следующий вывод: для обеспечения максимальной амплитуды изменения температуры в характерных точках глазного яблока необходимо при максимальном токе питания ТЭМ достичь требуемой температуры на переднем отрезке глазного яблока и затем поддерживать ее на этом уровне в течение заданного времени. Если управление термоэлектрической системой осуществлять по току питания ТЭМ, а не по температуре контактной головки, то процесс теплового воздействия получается нестабильным.

Библиографический список:

1. Александров, А.А. Теплотехника / А.А. Александров, А.М. Архаров, И.А. Архаров, [и др.]. - М: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. - 880 с.
2. Александров, В.В. Сравнительный анализ технологических преимуществ методов тепло-бальнеотерапии на санаторно-курортном этапе восстановительного лечения / В.В. Александров, В.И. Мизин, В.В. Ежов, О.П. Смолянинова // Курортная медицина. - 2021. - № 1. - С.5-14.
3. Баранов, А.Ю. Перенос теплоты в объекте общего криотерапевтического воздействия / А.Ю. Баранов, Т.А. Малышева, А.В. Савельева, А.Ю. Сидорова // Вестник Международной академии холода. - 2012. - № 2. - С.35-40.
4. Боголюбов, В.М. Техника и методики физиотерапевтических процедур / В.М. Боголюбов, [и др.]. - М.: Бином, 2017. - 464 с.
5. Гуляев, А.А. Оформление аппаратно/физиотерапевтических процедур согласно требованиям Минздрава РФ / А.А. Гуляев // Аппаратная косметология. - 2017. - № 1. - С.14-20.
6. Дашевский, З.М. Новое направление применения термоэлектрических преобразователей энергии / З.М. Дашевский, П.П. Константинов, С.Я. Сипидаров // Физика и техника полупроводников. - 2019. - № 7. - С.875-878.
7. Ежов, В.В. Применение сопочных вод и пелитов грязевых вулканов в санитарно-курортной практике / В.В. Ежов, В.И. Васенко, В.И. Мизин, А.Ю. Царев, Л.Ш. Дудченко, Т.Б. Игнатова // Вестник физиотерапии и курортологии. - 2020. - т.26, № 1. - С.72.
8. Жуков, Н.П. решение задач теплопроводности методом конечных элементов / Н.П. Жуков, Н.Ф. Майникова, С.С. Никулин, А.О. Антонов. - Томск: ТГТУ, 2014. - 80 с.
9. Зубкова, С.М. Роль тепловой компоненты в лечебном действии физических факторов / С.М. Зубкова // Физиотерапия, бальнеология и реабилитация. - 2011. - № 6. - С.3-10.
10. Исмаилов, Т.А. Исследование термоэлектрической системы для локального замораживания тканей гортани / Т.А. Исмаилов, О.В. Евдулов, Т.А. Рагимова // Термоэлектричество. - 2015. - № 2. - С.86-94.
11. Исмаилов, Т.А. Модель термоэлектрического устройства для теплового воздействия на рефлексогенные зоны / Т.А. Исмаилов, О.В. Евдулов, Н.А. Набиев, С.Г. Магомедова // Медицинская техника. - 2020. - № 1. - С.40-43.
12. Крайнов, А.Ю. Конвективный теплоперенос и теплообмен / А.Ю. Крайнов, К.М. Моисеева. - Томск: STT, 2017. - 80 с.
13. Пат. 2197197 РФ, МКИ А61F7/00. Термоэлектрическое полупроводниковое устройство для теплового воздействия на передний отрезок глазного яблока человека / Т.А.Исмаилов, А-Г.Д. Алиев, Аминова И.Ю. и др. - Заявл. 31.01.2001; Опубл. 27.01.2003.
14. Пономаренко, Г.Н. Восстановительная медицина: фундаментальные основы и перспективы развития / Г.Н. Пономаренко // Физическая и реабилитационная медицина. - 2022. - т. 4, № 1. - С.8-20.
15. Теория теплообмена / Под. ред. А.И. Леонтьева. - М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018. - 464 с.
16. Цыганов, Д.И. Криомедицина: процессы и аппараты / Д.И. Цыганов. - М.: САЙНС-ПРЕСС, 2011. - 304 с.
17. Goldsmid, H.J. Thermoelectric refrigeration / H.J. Goldsmid. - New York: Springer, 2013. - 240 p.
18. Hu, B. Thermoelectrics for medical applications: progress, challenges and perspectives / B. Hu, X.-L. Shi, Z.-G Chen., J. Zou // Chemical engineering journal. - 2022. - Vol. 437. - P.135268.
19. Hua, Zhang Effect of Chinese tuina massage therapy on resting state brain functional network of patients with chronic neck pain / Zhang Hua, Chen Hong, Wang Hao, Li Duoduo, Jia Baolin, Tan Zhongjian, Zheng Bin, Weng Zhiwen // Journal of traditional Chinese medical sciences. - 2015. - № 2. - P.60-68.
20. Pasquali P. Cryosurgery: a practical manual / P. Pasquali. - New York: Springer, 2015. - 441 p.
21. Zaferani, S.H. Thermoelectric coolers as thermal management systems for medical application: design, optimization and advancement / S.H. Zaferani, R. Ghomashchi, M.W. Sams, Z.-G. Chen // Nano energy. - 2021. - Vol. 90. - P. 106572.

References:

1. Alexandrov, A.A. *Teplotekhnika* / A.A. Alexandrov, A.M. Arkharov, I.A. Arkharov, [et al.]. - Moscow: Bauman Moscow State Technical University, 2017; 880 (In Russ).
2. Alexandrov, V.V. Comparative analysis of technological advantages of methods of heat and balneotherapy at the sanatorium-resort stage of restorative treatment / V.V. Alexandrov, V.I. Mizin, V.V. Yezhov, O.P. Smolyaninova. *Resort medicine*. 2021; 1:5-14. (In Russ).
3. Baranov, A.Yu. Heat transfer in the object of general cryotherapeutic influence / A.Yu. Baranov, T.A. Malysheva, A.V. Savelyeva, A.Yu. Sidorova. *Bulletin of the International Academy of Cold*. 2012; 2:35-40. (In Russ).
4. Bogolyubov, V.M. Techniques and methods of physiotherapy procedures / V.M. Bogolyubov, [I. al.]. M.: Binom, 2017; 464. (In Russ).
5. Gulyaev, A.A. Design of hardware/ physiotherapy procedures according to the requirements of the Ministry of Health of the Russian Federation / A.A. Gulyaev. *Hardware cosmetology*. 2017; 1:14-20. (In Russ).
6. Dashevsky, Z.M. New direction of application of thermoelectric energy converters / Z.M. Dashevsky, P.P. Konstantinov, S.Ya. Turpentine. *Physics and technology of semiconductors*. 2019; 7: 875-878. (In Russ).
7. Yezhov, V.V. The use of hill waters and mud volcano pelites in sanitary resort practice / V.V. Yezhov, V.I. Vasenko, V.I. Mizin, A.Yu. Tsarev, L.Sh. Dudchenko, T.B. Ignatova *Bulletin of Physiotherapy and Balneology*. 2020; 26(1):72. (In Russ).
8. Zhukov, N.P. Solution of thermal conductivity problems by the finite element method / N.P. Zhukov, N.F. Maynikova, S.S. Nikulin, A.O. Antonov. Tomsk: TSTU, 2014; 80. (In Russ).
9. Zubkova, S.M. The role of the thermal component in the therapeutic effect of physical factors / S.M. Zubkova // *Physiotherapy, balneology and rehabilitation*. 2011; 6:3-10. (In Russ).
10. Ismailov, T.A. Investigation of a thermoelectric system for local freezing of laryngeal tissues / T.A. Ismailov, O.V. Evdulov, T.A. Ragimova. *Thermoelectricity*. 2015; 2:86-94. .
11. Ismailov, T.A. Model of a thermoelectric device for thermal effects on reflexogenic zones / T.A. Ismailov, O.V. Evdulov, N.A. Nabiev, S.G. Magomedova. *Medical equipment*. 202; 1:40-43. (In Russ).
12. Krainov, K.M. Moiseeva. Convective heat transfer and heat transfer. Tomsk: STT, 2017; 80. (In Russ).
13. Pat. 2197197 RF, MKI A61F7/00. Thermoelectric semiconductor device for thermal effect on the anterior segment of the human eyeball / T.A. Ismailov, A.-G.D. Aliyev, Aminova I.Yu. et al. - Application 31.01.2001; Publ. 27.01.2003. (In Russ).
14. Ponomarenko, G.N. Restorative medicine: fundamental foundations and prospects of development. *Physical and rehabilitation medicine*. 2022; 4(1):8-20. (In Russ).
15. Theory of heat and mass transfer / Edited by A.I. Leontiev. Moscow: Bauman Moscow State Technical University, 2018; 464. (In Russ).
16. Tsyganov, D.I. Cryomedicine: processes and devices. M.: SCIENCE PRESS, 2011; 304. (In Russ).
17. Goldsmid, H.J. Thermoelectric refrigeration. New York: Springer, 2013; 240
18. Hu, B. Thermoelectrics for medical applications: progress, challenges and perspectives / B. Hu, X.-L. Shi, Z.-G. Chen., J. Zou. *Chemical engineering journal*. 2022; 437:135268.
19. Hua, Zhang Effect of Chinese tuina massage therapy on resting state brain functional network of patients with chronic neck pain / Zhang Hua, Chen Hong, Wang Hao, Li Duoduo, Jia Baolin, Tan Zhongjian, Zheng Bin, Weng Zhiwen // *Journal of traditional Chinese medical sciences*. 2015; 2:60-68.
20. Pasquali P. Cryosurgery: a practical manual. New York: Springer, 2015; 441.
21. Zaferani, S.H. Thermoelectric coolers as thermal management systems for medical application: design, optimization and advancement / S.H. Zaferani, R. Ghomashchi, M.W. Sams, Z.-G. Chen. *Nano energy*. 2021; 90: 106572.

Сведения об авторах:

Юсуфов Ширали Абдулкадиевич, кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической и общей электротехники; yshirali@yandex.ru

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

Магомедов Давуд Ахмеднабиевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры биотехнических и медицинских аппаратов и систем; kbimais@dstu.ru .

Евдулов Денис Викторович, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры теоретической и общей электротехники; ole-ole-ole@rambler.ru

Суракатова Патимат Нурмагомедовна, студентка; sur71@yandex.ru

Information about authors:

Shirali A. Yusufov, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Department of Theoretical and General Electrical Engineering; yshirali@yandex.ru

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

Davud A., Magomedov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Department of Biotechnical and Medical Devices and Systems; kbimais@dstu.ru

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

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

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 20.10.2022.

Одобрена после рецензирования/ Revised 09.11.2022.

Принята в печать/Accepted for publication 09.11.2022.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 347.93

DOI: 10.21822/2073-6185-2022-49-4-45-51

Оригинальная статья/Original Paper

**Развертывание отказоустойчивого сервера видеоконференцсвязи
для судебной системы на основе виртуализации**

О.И. Бокова¹, Н.С. Хохлов², А.О. Бокова³

¹ООО «Каскад»,

¹10944, г. Москва, ул. Ферганская, д. 2, к. 2, 7, Россия,

²Воронежский институт МВД России;

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

³Российский государственный университет правосудия;

³394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 95; Россия

Резюме. Цель. В статье рассматривается вопрос создания инфраструктурного решения, позволяющего на основе современных информационных технологий организовать отказоустойчивый сервер видеоконференцсвязи в судебной системе. **Метод.** Выбор технологий обусловливался потребностью использования сервера видеоконференцсвязи в многопользовательском режиме, а также удобством и лёгкостью администрирования. **Результат.** Использование виртуализации для сервера видеоконференцсвязи позволит гибко функционировать как системе в целом, так и всем её компонентам, изолировать использование ресурсов, и настраивать мониторинг для наблюдения за поведением системы. **Вывод.** Преимуществом представленного в статье решения является его стоимость, которая будет выражаться только в наличии серверной группировки либо её аренды (вместо ежемесячной или ежегодной платы коммерческим организациям). Также к преимуществам можно отнести наличие инженера среднего уровня подготовленности в штатной структуре организации.

Ключевые слова: информационные технологии, видеоконференцсвязь, отказоустойчивый сервер, сервисы видеоконференцсвязи

Для цитирования: О.И. Бокова, Н.С. Хохлов, А.О. Бокова. Развертывание отказоустойчивого сервера видеоконференцсвязи для судебной системы на основе виртуализации. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022; 49(4):45-51. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-4-45-51

**Deployment of a fault-tolerant videoconferencing server
for a virtualization-based judicial system**

O.I. Bokova¹, N.S. Khokhlov², A.O. Bokova³

¹Cascade LLC,

¹10944, Moscow, Ferghanskaya Str., 2, rm 2, 7, Russia,

²Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia,

²53 Patriotov Ave., Voronezh 394065, Russia,

³Russian State University of Justice;

³95, 20th Anniversary of October Str., Voronezh 394006, Russia

Abstract. Objective. The article discusses the issue of creating an infrastructure solution that allows, on the basis of modern information technologies, to organize a fault-tolerant videoconferencing server in the judicial system. The choice of technologies was determined by the need to use a video conferencing server in multi-user mode, as well as the convenience and ease of administration. The use of virtualization for the videoconferencing server will allow flexible functioning of both the system as a whole and all its components, isolate the use of resources, and configure monitoring to monitor the behavior of the system. The advantage of the solution presented in the article is its cost, which will be

expressed only in the presence of a server grouping or its lease (instead of a monthly or annual fee to commercial organizations). Also, the advantages include the presence of an engineer of an average level of preparedness in the staff structure of the organization.

Keywords: information technologies, video conferencing, fault-tolerant server, video conferencing services

For citation: O.I. Bokova, N.S. Khokhlov, A.O. Bokova. Deployment of a fault-tolerant videoconferencing server for a virtualization-based judicial system. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science. 2022; 49 (4): 45-51. DOI: 10.21822 /2073-6185-2022-49-4-45-51

Введение. В настоящий момент развитие информационных технологий происходит молниеносно, осуществляется развитие искусственного интеллекта, больших данных, облачных технологий и др. Развитие и внедрение инфокоммуникационных технологий, а также различных технологических решений во все сферы общественных отношений – одно из приоритетных направлений развития современного мира.

В связи с такой бурной активностью также ускоренными темпами происходит автоматизация деятельности человека во всех его сферах, начиная от промышленности, заканчивая государственным сектором. Данный процесс характеризуется внедрением сервисов, помогающих контролировать исполнение поставленных задач руководством, организовывать рабочий процесс, активное взаимодействие структурных подразделений, составлять аналитические отчёты и т.д.

Постановка задачи. Для повышения организации деятельности судебной системы и перехода на более качественный уровень необходимо внедрение информационных технологий, так и комплексная модернизация инфраструктуры [1, 2].

Формирование высоко технологических решений в организации требует введение в штат профессиональных технических работников, зачастую сразу целых подразделений, что, соответственно, будет характеризоваться дополнительными расходами. Данный процесс уже в ближайшем будущем неизбежен [3, 4].

Внедрение современных IT-технологий в работу судебных систем – один из наиболее эффективных способов повышения уровня доступности и качества правосудия в мире. В то же время, необходимо отметить, что для качественной работы «дистанционного правосудия», несомненно, необходима грамотная техническая реализация [2].

Использование сервисов видеоконференцсвязи для любой организации в настоящее время является достаточно привычным. Данные программные решения позволяют решить следующий круг задач:

1. Ускорение взаимодействия подразделений – позволяет в кратчайший срок собрать заинтересованных лиц для решения критической задачи;
2. Сокращение расходов – позволяет экономить на командировках сотрудников распределённых подразделений;
3. Использование удалённого формата работы – сокращение офисного формата работы позволит экономить на содержании дополнительного помещения для сотрудников;
4. Удалённые консультации – позволяет взаимодействовать сотрудникам различных подразделений для устранения неопределённостей и проведения консультаций.

Со стороны руководителя, а также обычного пользователя все преимущества видеоконференцсвязи очевидны. Но для обслуживающего персонала (администраторов) поддержание работоспособности подобных программных решений может вызывать трудности. А именно, нехватка оборудования или его отсутствие; нехватка ресурсов в случае его наличия; сложная конфигурация для большого количества пользователей; быстрое реагирование на неисправности; пропускная способность канала связи в организации.

В связи с вышеперечисленным, разработка отказоустойчивого сервиса видеоконференцсвязи, основанного на свободно распространяемом программном обеспечении, в настоящее время является актуальной задачей.

Методы исследования. В современном мире администратор информационных систем представляет собой универсального работника, который устанавливает баланс между потребностями пользователей и имеющимися серверными мощностями. Для построения отказоустойчивого сервиса видеоконференцсвязи необходимо понимать возможные сценарии проведения видеоконференции, а также то, какой из сценариев будет наиболее ресурсоёмким [5, 6-11], рис. 1.

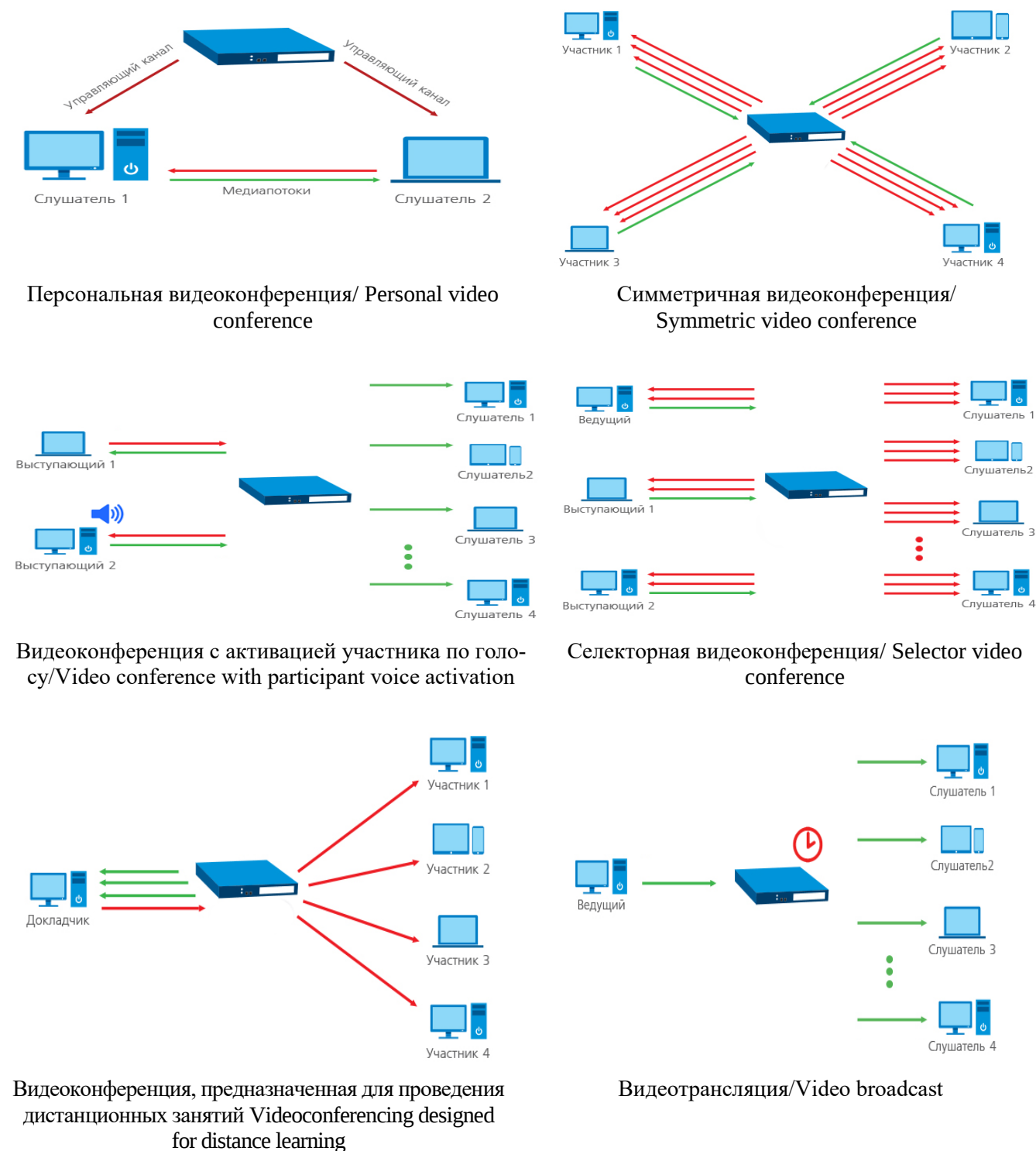


Рис.1. Сценарии проведения видеоконференции
Fig.1. Videoconferencing scenarios

Сценарии проведения видеоконференции, в свою очередь, разделяют на персональные и групповые, где, к первым относятся связь между двумя пользователями (аналогично телефонному разговору), а к групповым можно отнести (рис.1):

- симметричная видеоконференция, представляющая собой конференцию, в состав которой входят более двух участников, где одновременно все пользователи и видят, и слышат друг друга;
- видеоконференция с активацией участника по голосу, представляющая собой конференцию, где фактически все участники являются докладчиками; сервер видеоконференцсвязи автоматически переключается между участниками, как только возникает голосовая активность с любой из сторон;
- селекторная видеоконференция, представляющая собой конференцию, где организатор конференции назначает из числа слушателей докладчиков;
- видеоконференция, предназначенная для проведения дистанционных занятий, представляющая собой конференцию, где все участники видят и слышат только докладчика;
- видеотрансляция, представляющая собой конференцию, где докладчик вещает на широкую аудиторию слушателей, при этом, он не видит и не слышит участников (для коммуникации зачастую используют чат).

Перечисленные сценарии проведения видеоконференции часто используются в повседневной деятельности. Ключевым фактором, влияющим на загрузку сервиса видеоконференцсвязи, будет являться количество пользователей транслирующих видео- и количество пользователей, подключенных к конференции. В связи с увеличением данных значений нагрузка на сервер будет увеличиваться в геометрической прогрессии. Одной из главных задач для администратора подобных систем является их реализация в отказоустойчивом режиме.

В существующих реалиях есть несколько подходов, позволяющих организовать работу сервиса видеоконференцсвязи.

Первый, основывается на монолитной архитектуре, второй – на микросервисной. Плюсы монолитной архитектуры заключается в быстром развертывании, минусы – в отсутствии гибкости и плохой масштабируемости в случае необходимости использования дополнительных ресурсов.

Плюсы микросервисной архитектуры заключаются в большей гибкости и лучшей масштабируемости, минусами же является более сложная настройка. Тактика развертывания подобных сервисов для каждой организации будет индивидуальна и в основном зависит от частоты и количества использований.

В данной статье будет разработана структура сервиса видеоконференцсвязи приблизительно для 1500 активных пользователей с возможностью масштабирования при пиковых нагрузках.

Стандартом для управления микросервисной архитектурой в данный момент является Kubernetes. Данная технология в отличие от стандартного инструмента Docker позволяет гибко управлять развернутыми под её управлением контейнерами, а именно управлять дисковым пространством, масштабироваться, применять тонкие настройки конфигурации и т. д.

Развертывание сервиса видеоконференцсвязи, основываясь на подобной технологии, является лучшей практикой на данной стадии технического развития общества. Общая структура представлена на рис. 2.

Ключевым для решения задачи масштабирования системы будет являться использование технологии Kubernetes, представляющая собой открытое программное обеспечение для оркестровки контейнеров. Первым на пути пользовательского запроса встречает сервис типа Ingress controller, позволяющий организовать единую точку входа интернет трафика в кластер и управлять ею. Функциональность, возложенная на представленный выше инструмент, позволит скрыть всю ниже расположенную структуру.

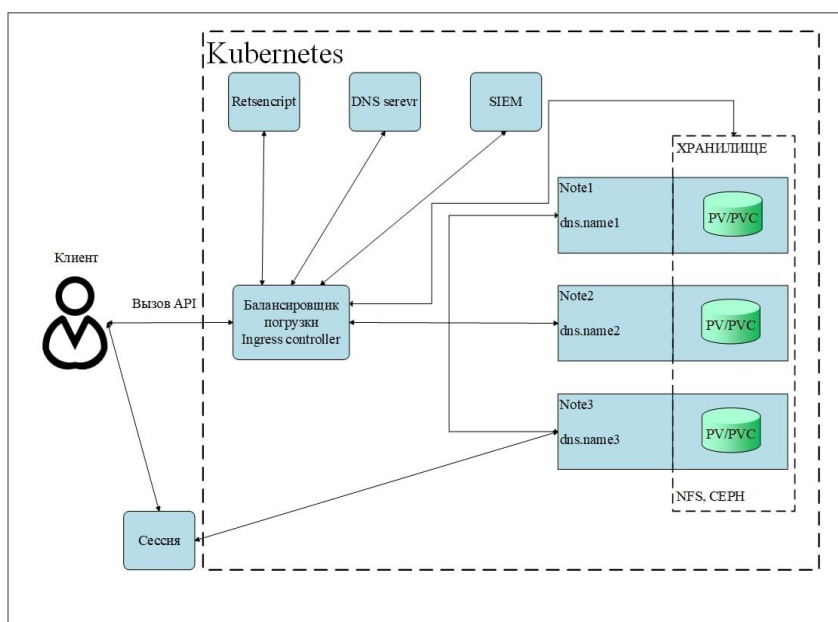


Рис.2. Структура сервиса видеоконференцсвязи
Fig.2. The structure of the video conferencing service

Обсуждение результатов. В настоящее время представлено множество инструментов, решающих подобные задачи. В открытом доступе представлено большое количество обзоров, описывающих производительность инструментов, предпочтение же выбора и управление данным компонентом системы остаётся за навыками и имеющимися компетенциями у администратора.

Упомянутый выше инструмент может выступать в качестве балансировщика нагрузки (load balancer), предназначение которого будет заключаться в распределении нагрузки на сервисы видеоконференцсвязи. При распределении на сервер BigBlueButton с минимальной конфигурацией поддерживает около 200 одновременных пользователей, необходимая потребность будет заключаться в 5-7 репликах (экземплярах). Но с точки зрения оптимального управления производительностью для начальной конфигурации рекомендуется использовать 1-3.

В качестве обслуживающих инструментов для Kubernetes кластера используем cert-manager для управления SSL сертификатами и уже предустановленный DNS сервер CoreDNS.

Для хранения данных видеоконференций возможно использование как встроенных в Kubernetes систем хранения данных, уже настроенные сетевые файловые системы, так и программный продукт Ceph, представляющий собой распределенную файловую хранилище данных. Для мониторинга и алертинга существует возможность дополнительно использовать следующие инструменты: Zabbix, ELK stack, Prometheus, Grafana. Для анализа и мониторинга угроз информационной безопасности в Kubernetes инструменты Falco и Logz.io.

Стандартная предподготовка сервиса видеоконференцсвязи включает в себя описание набора ресурсов типа Service, который, в свою очередь, имеет своей составной частью настройку балансировщика нагрузки и типа Deployment, представляющий собой описание спецификации развертывания.

Ключевым для реализации отказоустойчивого кластера сервиса видеоконференцсвязи является Horizontal Pod Autoscaler, реализованный как ресурс Kubernetes API и контроллер. Данный ресурс определяет поведение контроллера, обладает возможностью в режиме реального времени автоматически масштабировать приложения любого вида. А именно, в заданный период времени регулирует желаемый масштаб используемого приложения (горизонтальное масштабирование). Horizontal Pod Autoscaler наблюдает за показателями, такими как среднее использование ЦП, среднее использование памяти или любой другой пользовательской метрикой.

Для метрик ресурсов каждого модуля (например, ЦП) контроллер извлекает метрики из

API метрик ресурсов. Сверяя заданное целевое значение использования ресурсов, контроллер вычисляет значение использования в процентах для каждого экземпляра в каждом поде. Следующим этапом контроллер берёт среднее значение использования ресурсов по необходимым модулям и создаёт соотношение, используемое для принятия решения по масштабированию приложения.

В самом простом виде данная функциональность будет рассчитана следующим образом:

$$dR = \text{ceil}[cR * (cMV / dMV)], \quad (1)$$

где dR – количество результирующих экземпляров сервиса видеоконференцсвязи,

ceil – функция округления дроби до целого,

cR – текущее количество экземпляров,

cMV – текущее значение отслеживаемой метрики,

dMV – ожидаемое значение отслеживаемой метрики.

Сервис типа HorizontalPodAutoscaler также поддерживает метрики приложений. Рассмотрим пример работы сервиса если текущее значение метрики работы процессора равно 400 millicpu а желаемое значение равно 200 millicpu, количество реплик будет удвоено, поскольку $400.0 / 200.0 = 2.0$. Если вместо текущего значения 100 millicpu, количество реплик уменьшится вдвое так, как $100.0 / 200.0 = 0.5$.

Разнообразие и количество настроек сервиса типа Horizontal Pod Autoscaler достаточно обширна. При эксплуатации сервиса видеоконференцсвязи они будут фактически индивидуальны для каждой конкретной организации.

Вывод. Совершенствованием внешней формы организации судебной власти является информатизация. Развитие электронного правосудия невозможно в отрыве от процессов его информатизации. Информатизация органов правосудия находится в непрерывном развитии. Для реализации прав на доступ к правосудию зачастую возникает потребность, а в ряде случаев и единственная возможность, участвовать в судебном заседании удалённо, с использованием системы видеоконференцсвязи [7]. В статье рассмотрена актуальность разработки отказоустойчивого сервера видеоконференцсвязи. Рассмотрены сценарии проведения видеоконференции, проведён анализ их ресурсопотребления. Также показаны преимущества реализации сервиса видеоконференцсвязи с использованием виртуализации. Представлено архитектурное решение развертывания сервиса видеоконференцсвязи.

Библиографический список:

1. Бокова А.О. Проблемы организации видеоконференцсвязи в суде //Актуальные вопросы эксплуатации систем охраны и защищенных телекоммуникационных систем: сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции 11 июня 2020 г. Воронеж, Воронежский институт МВД России, 2020. – С. 13–16.
2. Бокова А.О., Палеха Р.Р. Информатизация судебной деятельности и её аспекты: состояние, проблемы и перспективы развития/ А.О. Бокова, Р.Р. Палеха // Вестник Воронежского института ФСИИ. – Воронеж, 2022. – № 2. – 2022. – С. 160-166.
3. Жайворонок Д.А., Бокова О.И. Проблемы организации видеоконференцсвязи в суде: Вестник Воронежского института высоких технологий, 2021. – № 2 (37). – С. 40-44.
4. Багаутдинов Ф.Н. Некоторые вопросы организации видеоконференцсвязи между судами регионов и вышестоящими судами: Вестник Казанского юридического института МВД России, 2020. – Т. 11. – № 2 (40). – С. 233-236.
5. Геворкян А.Х. Организационно-правовые особенности использования видеоконференцсвязи в судах общей юрисдикции. Современные проблемы лингвистики и методики преподавания русского языка в ВУЗе и школе, – 2022. № 35. – С. 490-493.
6. Осодоева Н.В. Механизм производства допроса "анонимных" свидетелей посредством видеоконференцсвязи в суде: Закон и право, 2021. – № 11. – С. 187-190.
7. Шибаев Д.В. Организационно-правовые и технические аспекты применения технологии видеоконференцсвязи в арбитражных судах Российской Федерации: Вестник института: преступление, наказание, исправление, 2012. – № 4 (20). – С. 66-68.
8. Миронов А. Н. Использование системы видеоконференцсвязи в судебной деятельности [Текст] / А. Н. Миронов, Ю. В. Миронова // Российский судья. – 2019. – № 7. – С. 22-26.
9. Ямашкина М. В. Видеоконференцсвязь в гражданском процессе [Текст] / М. В. Ямашкина // Научное обозрение. – 2015. – № 10-2. – С. 336-340.
10. Глава 17. Суды и современные информационные технологии. Законы <http://zakoniros.ru>.
11. Передача видеоизображений в условиях коммутационной среды. Видеоконференцсвязь <http://knowledge.allbest.ru>

References:

1. Bokova A.O. Problems of organizing videoconferencing in court. Actual issues of operation of security systems and secure telecommunication systems: collection of materials of the All-Russian scientific and practical conference on June 11, 2020. Voronezh, Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia, 2020; 13–16. (In Russ).
2. Bokova A.O., Palekha R.R. Informatization of judicial activity and its aspects: state, problems and development prospects. *Bulletin of the Voronezh Institute of the Federal Penitentiary Service*. Voronezh, 2022; 2: 160-166. (In Russ).
3. Zhaivoronok D.A., Bokova O.I. Problems of organizing videoconferencing in court: *Bulletin of the Voronezh Institute of High Technologies*, 2021; 2 (37): 40-44. (In Russ).
4. Bagautdinov F.N. Some issues of organizing videoconferencing between regional courts and higher courts. *Bulletin of the Kazan Law Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia*, 2020; 11; 2 (40): 233-236. (In Russ).
5. Gevorkyan A.Kh. Organizational and legal features of the use of videoconferencing in courts of general jurisdiction. *Modern problems of linguistics and methods of teaching the Russian language at a university and school*, 2022; 35: 490-493. (In Russ).
6. Osodoeva N.V. The mechanism for the interrogation of "anonymous" witnesses through videoconferencing in court: *Law and Law*, 2021; 11: 187-190. (In Russ).
7. Shibaev D.V. Organizational, legal and technical aspects of the use of videoconferencing technology in the arbitration courts of the Russian Federation. *Bulletin of the Institute: crime, punishment, correction*, 2012; 4 (20): 66-68. (In Russ).
8. Mironov A. N. The use of a videoconferencing system in judicial activity [Text]. A. N. Mironov, Yu. V. Mironova. *Russian judge*. 2019; 7: 22-26. (In Russ).
9. Yamashkina M. V. Video conferencing in civil proceedings [Text] / M. V. Yamashkina. *Scientific Review*. 2015; 10(2): 336-340. (In Russ).
10. Chapter 17. Courts and modern information technologies. Laws <http://zakoniro.ru>. (In Russ).
11. Transmission of video images in a switching environment. Video conferencing [http:// knowledge.allbest.ru](http://knowledge.allbest.ru) (In Russ).

Сведения об авторах:

Бокова Оксана Игоревна, доктор технических наук, профессор; научно-технический консультант; o.i.bokova@gmail.com

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

Бокова Алёна Олеговна, студент; a.o.bokova@gmail.com

Information about authors:

Oksana I. Bokova, Dr. Sci. (Eng.), Prof.; Scientific and Technical Consultant; o.i.bokova@gmail.com

Nikolai S. Khokhlov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Department of infocommunication systems and technologies; nikolayhohlov@rambler.ru

Alena O. Bokova, Student; a.o.bokova@gmail.com

Конфликт интересов / Conflict of interest

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

Поступила в редакцию/Received 30.09.2022.

Одобрена после рецензирования/ Reviced 20.10.2022.

Принята в печать/Accepted for publication 20.10.2022.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 004.056.57

DOI: 10.21822/2073-6185-2022-49-4-52-57

Оригинальная статья /Original Paper

Расчет коэффициента уровня защищенности автоматизированной системы органов внутренних дел на основе информационной обеспеченности СЗИ обновлениями сигнатур вирусов и угроз

А.О. Ефимов, И.Г. Дровникова, Е.А. Рогозин, В.Р. Романова, Е.В. Филь

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

Резюме. Цель. В данной работе рассмотрена защита от угроз, наступающих в большей частоте случаев в период от начала загрузки операционной системы. Рассмотрение различных конфигураций позволит произвести обзор достаточно широкого спектра возникающих ситуаций. Для решения поставленной задачи необходимо осуществить определение уязвимых мест, а также произвести обозначение коэффициентов, определяющих состояние автоматизированной системы. **Метод.** Средствами вычислительной техники являются совокупность программных и технических компонентов (в том числе средств защиты информации) систем обработки данных, способных функционировать самостоятельно или в составе других систем. Применены методы анализа процесса воздействия компьютерных угроз на этапе загрузки операционной системы. **Результат.** Предложена методика расчет коэффициента защищенности автоматизированных систем в защищенном исполнении в зависимости от наличия необходимых политик безопасности и своевременного обновления баз сигнатур вирусов и угроз. Обобщены уязвимости в процессе запуска операционной системы, сделаны выводы о расчете коэффициента уровня защищенности автоматизированной системы ОВД на основе информационной обеспеченности СЗИ обновлениями сигнатур вирусов и угроз. **Вывод.** Разработанная методика позволяет производить оценку защищенности автоматизированных систем с учетом обстановки информационной обеспеченности на местах.

Ключевые слова: оценка защищенности, автоматизированная система, защита информации, средство защиты информации, угроза информации

Для цитирования: А.О. Ефимов, И.Г. Дровникова, Е.А. Рогозин, В.Р. Романова, Е.В. Филь. Расчет коэффициента уровня защищенности автоматизированной системы органов внутренних дел на основе информационной обеспеченности СЗИ обновлениями сигнатур вирусов и угроз. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022; 49(4):52-57. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-4-52-57

Calculation of the security level coefficient of the automated system of the internal affairs bodies based on the information security of the information security system with updates of virus and threat signatures

A.O. Efimov, I.G. Drovnikova, E.A. Rogozin, V.R. Romanova, E.V. Phil

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

Abstract. Objective. This paper considers protection against threats that occur more often in the period from the start of the operating system boot. Consideration of various configurations will allow an overview of a fairly wide range of situations that arise. To solve the problem, it is necessary to determine the vulnerabilities, as well as to designate the coefficients that determine the state of the automated system. **Method.** Computer facilities are a set of software and hardware components (including information security tools) of data processing systems that can function independently or as part of other systems. Methods for analyzing the process of the impact of computer threats at the stage of

loading the operating system are applied. **Result.** A technique is proposed for calculating the security factor of automated systems in a secure design, depending on the availability of the necessary security policies and the timely updating of virus and threat signature databases. The vulnerabilities in the process of starting the operating system are summarized, conclusions are drawn on the calculation of the security level coefficient of the automated ATS system based on the information security of the information security system with updates of virus and threat signatures. **Conclusion.** The developed methodology makes it possible to assess the security of automated systems, taking into account the situation of information security in the field.

Keywords: security assessment, automated system, information security, information security tool, information threat

For citation: A.O. Efimov, I.G. Drovnikova, E.A. Rogozin, V.R. Romanova, E.V. Phil.

Calculation of the security level coefficient of the automated system of the internal affairs bodies based on the information security of the information security system with updates of virus and threat signatures. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science. 2022; 49 (4): 52-57. DOI: 10.21822 /2073-6185-2022-49-4-52-57

Введение. В данный момент крайне актуальными являются вопросы защищенности автоматизированных систем от компьютерных и иных преднамеренных угроз. Определенно существует огромное множество угроз. В данной работе будет рассмотрена защита от угроз, наступающих в периоде от начала загрузки операционной системы.

Рассмотрение различных конфигураций позволит произвести обзор достаточно широкого спектра возникающих ситуаций. В данной предметной области средствами вычислительной техники являются совокупность программных и технических компонентов (в том числе средств защиты информации) систем обработки данных, способных функционировать самостоятельно или в составе других систем.

Постановка задачи. В целях расчета коэффициента уровня защищенности автоматизированной информационной системы, необходимо произвести анализ процесса воздействия компьютерных угроз на этапе загрузки операционной системы. Для решения поставленной задачи, необходимо осуществить определение уязвимых мест, а также произвести обозначение коэффициентов, определяющих то либо иное состояние автоматизированной системы.

Методы исследования. В первую очередь рассмотрим порядок загрузки семейства операционных систем Windows и Linux-подобных операционных систем (рис.1).



Рис.1. Схема порядка запуска операционной системы
Fig.1. Scheme of the order of starting the operating system

Порядок загрузки операционных систем Windows и Linux довольно схож, процедуры, протекающие в процессе запуска, выполняют одни и те же функции.

На первых пяти этапах запуска, происходят выполнение команд загрузки, зависящих от настроек BIOS, и носителей данных. На этих этапах рекомендуется применять средства защиты информации от несанкционированного доступа с функционалом доверенной загрузки [1].

Одним из наиболее узких мест является передача управления от загрузчика верхнего уровня к загрузчику операционной системы. Конечно, современные средства защиты информации разработаны таким образом, что своевременно противодействуют возникающим угрозам и перекрывают множество уязвимых мест [2]. Но обеспеченность защиты средствами защиты напрямую зависит от качества информационной обеспеченности средств защиты информации, а также всей остальной системы в целом. В последнее время все чаще стали обнаруживаться уязвимости, связанные с ошибками в проектировании ряда центральных процессоров, а также уязвимостей связанных с применением различных наборов инструкций и взаимодействия вместе с ними операционной системы [4].

Основой рассматриваемых угроз являются: УБИ.214 (угроза несвоевременного выявления и реагирования компонентами информационной (автоматизированной) системы (в том числе средствами защиты информации) на события безопасности информации), УБИ.217 (угроза использования скомпрометированного доверенного источника обновлений программного обеспечения), УБИ.192 (угроза использования уязвимых версий программного обеспечения) [5].

В условиях наличия неопределенного числа уязвимостей жизненно необходимо иметь постоянное обновление средств защиты информации, антивирусов, файрволла, а также полного набора патчей безопасности операционной системы.

Но и даже в этом случае все не так однозначно: системы, применяемые вне локальных сетей и сети Интернет, обрабатывающие лишь локальную информацию, по своей сути не требуют дополнительной оценки защищенности в связи с отсутствием каналов получения программных угроз. Поэтому предлагается рассмотреть ряд различных конфигураций АРМ, и привести ряд ситуаций к общему коэффициенту.

Определим основные параметры, которые будут иметь значение при расчёте коэффициента (буквенные обозначения определены в скобках):

1. Наличие подключенного к АРМ сетевого соединения (А);
2. Наличие средств защиты информации от несанкционированного доступа (В);
3. Определен ли ряд носителей, с помощью которых возможно вносить информацию на АРМ (С);
4. Наличие средств антивирусной защиты (D);
5. Наличие программного или программно-аппаратного межсетевого экрана (Е);
6. Своевременность обновления баз данных сигнатур вирусов и угроз (коэффициент информационной обеспеченности) (Х);
7. Число элементов, участвующих в расчете (Z).

В качестве показателей, характеризующих процесс оценки защищенности АС ОВД, предлагается выбрать вероятности преодоления злоумышленником средства защиты, из совокупности которых будет складываться оценка защищенности.

$$P_{защ} = 1 - \prod_{m=1}^k P_{преод}_m \quad (1)$$

где k – количество средств защиты, которые необходимо преодолеть злоумышленнику, чтобы получить доступ к ресурсам;

P – вероятность преодоления нарушителем m-ого средства защиты.

Определим общий коэффициент уровня защищенности АС ОВД на основе информационной обеспеченности СЗИ. Для решения выше поставленной цели определим составные части:

1. Параметры 1, 2, 4, 5 будут влиять, на величину непосредственно и принимать значения 0, 1. Это будет указывать на наличие того, либо иного элемента в системе: 1 – В системе

присутствует элемент; 0 – Элемент в системе отсутствует (в случае параметра 1 не влияет на уровень угроз, в остальных случаях снижает защиту).

2. Параметр 3 будет учитывать, определены ли носители информации с помощью, которых будет вноситься информация в АС. Будет принимать следующие значения: 1 – Носители определены и используются исключительно среди защищенных и контролируемых АС; 0.5 – Носители определены; 0 – Носители не определены, в систему вносится информация с неопределенного числа носителей (повышает риски безопасности).

3. Параметр 7 напрямую зависит от параметра 1, если $A = 1$, то $Z=4$, иначе $Z=4$.

4. Параметр 6 определяет информационную обеспеченность средств защиты информации, и указывает насколько средства защиты получают обновления:

- все обновления средств защиты поступают автоматически и незамедлительно $X=1$;
- обновления СЗИ поступают незамедлительно лишь до части средств, остальные в ручном режиме $X=0.8$;
- обновления средств защиты информации поступают в скорые сроки в ручном режиме $X=0.6$;
- обновления поступают несвоевременно в ручном режиме $X=0.4$;
- обновления антивирусной системы и межсетевого экрана производятся, иные средства ЗИ не обновляются $X=0.2$;
- обновления не производятся $X=0$.

Соотнесем полученную информацию и составим итоговую формулу коэффициента уровня защищенности автоматизированной системы ОВД на основе информационной обеспеченности СЗИ обновлениями сигнатур вирусов и угроз:

$$K = \frac{(A*B)+C+D+E}{Z} * X \quad (2)$$

где А – наличие подключенного к АРМ сетевого соединения;

В – наличие средств защиты информации от несанкционированного доступа;

С – определен ли ряд носителей с помощью, которых возможно вносить информацию на АРМ;

Д – наличие средств антивирусной защиты;

Е – наличие программного или программно-аппаратного межсетевого экрана;

З – число элементов, участвующих в расчете;

Х – своевременность обновления баз данных сигнатур вирусов и угроз (коэффициент информационной обеспеченности).

Данный коэффициент подставим в формулу (1), и получим формулу, осуществляющую расчет защищенности в зависимости от вероятности преодоления злоумышленником средства защиты с учетом зависимостей от информационной обеспеченности.

$$P_{\text{защ.иО}} = (1 - \prod_{m=1}^k P_{\text{преод.}}) * K \quad (3)$$

Данная формула должна позволить производить расчет защищенности схожих по своей конструкции систем, но с учетом конкретных особенностей настройки и установки системы. Стоит обратить внимание, что при наличии полного набора средств защиты, и их своевременном обновлении, риски значительно снижаются.

Обсуждение результатов. В качестве вычислительного эксперимента произведем корректировку величины защищенности схожих по своей структуре АС (табл.1).

За основу возьмем начальную величину защищенности равную 0.8.

Таблица 1. Задаваемые параметры

Table 1. Parameters to be set

№ АС	A	B	C	D	E	Z
1.	1	1	0.5	0	0	4
2.	0	1	0.5	1	1	3

Из полученных данных получим следующее распределение защищенности:

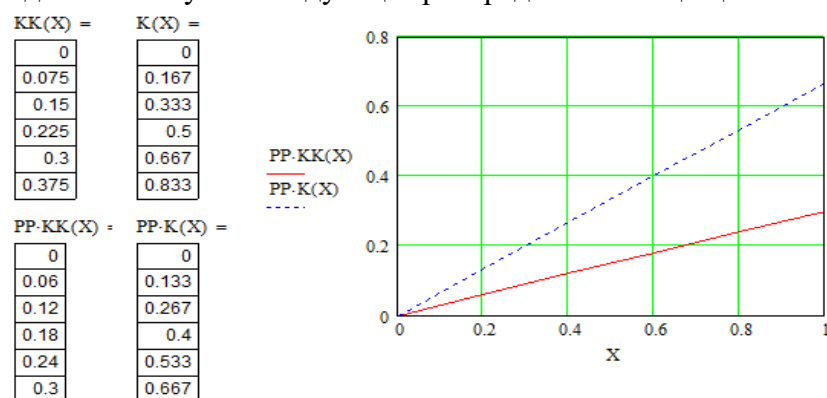


Рис. 2. Реализация расчета в системе Mathcad

Fig. 2. Implementation of the calculation in the Mathcad system

Как видно на рис.2, наличие антивирусной системы и средств ЗИ от несанкционированного доступа позволили значительно сохранить уровень защищенности, рассчитанный с учетом коэффициента информационной обеспеченности. Чего нельзя сказать про другой случай, когда влияние этого коэффициента оказалось слишком велико и привело к потерям почти более чем в 2 раза.

Вывод. В работе произведено рассмотрение вопросов расчета коэффициента защищенности автоматизированных систем в защищенном исполнении в зависимости от наличия необходимых политик безопасности и своевременного обновления баз сигнатур вирусов и угроз.

Обобщены уязвимости в процессе запуска операционной системы, сделаны выводы о расчете коэффициента уровня защищенности автоматизированной системы ОВД на основе информационной обеспеченности СЗИ обновлениями сигнатур вирусов и угроз.

Разработанная методика может позволить производить оценку защищенности автоматизированных систем с учетом обстановки информационной обеспеченности на местах.

Библиографический список:

1. Об утверждении Наставления по технической эксплуатации средств связи и автоматизации территориальных органов Министерства внутренних дел Российской Федерации: приказ МВД России от 30.11.2016 № 772 // Информационно-правовой портал системы КонсультантПлюс. – Режим доступа: <http://base.consultant.ru> (дата обращения: 15.02.2022).
2. Об утверждении состава и содержания организационных и технических мер по обеспечению безопасности персональных данных при их обработке в информационных системах персональных данных: приказ ФСТЭК России от 18.02.2013 № 21 // Информационно-правовой портал системы КонсультантПлюс. – Режим доступа: <http://base.consultant.ru> (дата обращения: 27.02.2022).
3. Об утверждении Требований о защите информации, не составляющей государственную тайну, содержащейся в государственных информационных системах: приказ ФСТЭК России от 11.02.2013 № 17 // Информационно-правовой портал системы КонсультантПлюс. – Режим доступа: <http://base.consultant.ru> (дата обращения: 15.02.2022).
4. Методика оценки угроз безопасности информации: Методический документ ФСТЭК России от 05.02.2021 // Информационно-правовой портал системы КонсультантПлюс. – Режим доступа: <http://base.consultant.ru> (дата обращения: 27.10.2022).
5. Банк данных угроз безопасности информации: [Электронный ресурс]. ФСТЭК России. URL: <https://bdu.fstec.ru/>. (Дата обращения: 27.10.2022).
6. ФСТЭК РФ. Руководящий документ. Защита от несанкционированного доступа к информации. Термины и определения.
7. ГОСТ Р 50922–2006. Защита информации. Основные термины и определения //М.: Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. 2006. 12 с.
8. ГОСТ Р 56546–2015. Защита информации. Уязвимости информационных систем. Классификация уязвимостей информационных систем. 2016. 8с.
9. ФСТЭК РФ. Руководящий документ. Автоматизированные системы. Защита от несанкционированного доступа к информации. Классификация автоматизированных систем и требования по защите информации.
10. ГОСТ Р 15408–2013. Методы и средства обеспечения безопасности. Критерии оценки безопасности информационных технологий // М.: Стандартинформ. 2014. 152 с.
11. ГОСТ Р 53114–2008. Защита информации. Обеспечение информационной безопасности в организации. Основные термины и определения. 2008. 22с.
12. Руководящий документ. Безопасность информационных технологий. Концепция оценки соответствия автоматизированных систем требованиям безопасности информации: утв. ФСТЭК России 2004 г.

13. Руководящий документ Гостехкомиссии. Безопасность информационных технологий. Критерии оценки безопасности информационных технологий: утв. Приказом Гостехкомиссии от 19.06.2002 №187.
14. Методика определения угроз безопасности информации в информационных системах: утв. ФСТЭК России 2015 г.
15. Коцыняк М.А., Кулешов И.А., Кудрявцев А.М., Лаута О.С. Киберустойчивость ИТКС. СПб, 2015 г.

References:

1. On the approval of the Manual on the technical operation of communications and automation of the territorial bodies of the Ministry of Internal Affairs of the Russian Federation: order of the Ministry of Internal Affairs of Russia dated November 30, 2016;772. *Information and legal portal of the ConsultantPlus system*. – Access mode: <http://base.consultant.ru> (date of access: 15.02.2022). (In Russ)
2. On approval of the composition and content of organizational and technical measures to ensure the security of personal data during their processing in personal data information systems: order of the FSTEC of Russia dated February 18, 2013; 21. *Information and legal portal of the ConsultantPlus system*. – Access mode: <http://base.consultant.ru> (date of access: 02/27/2022). (In Russ)
3. On approval of the Requirements for the protection of information that is not a state secret contained in state information systems: order of the FSTEC of Russia dated February 11, 2013; 17. *Information and legal portal of the ConsultantPlus system*. – Access mode: <http://base.consultant.ru> (date of access: 02/15/2022). (In Russ)
4. Methodology for assessing threats to information security: Methodological document of the FSTEC of Russia dated 02/05/2021 // *Information and legal portal of the ConsultantPlus system*. – Access mode: <http://base.consultant.ru> (date of access: 10/27/2022). FSTEC of the Russian Federation. Guidance document. Protection against unauthorized access to information. Terms and definitions. (In Russ)
5. Data bank of information security threats: [Electronic resource]. FSTEC of Russia. URL: <https://bdu.fstec.ru/>. (Date of access: 27.10.2022). (In Russ)
6. FSTEC RF. Management document. Protection against unauthorized access to information. Terms and Definitions.
7. GOST R 50922-2006. Information protection. Basic terms and definition // Moscow: Federal Agency for Technical Regulation and Metrology. 2006.12 K. (In Russ)
8. GOST R 56546-2015. Information protection. Communications of information systems. Classification of information systems. 2016; 8. (In Russ)
9. FSTEC of the Russian Federation. Guidance document. Automated systems. Protection against unauthorized access to information. Classification of automated systems and information security requirements. (In Russ)
10. GOST R 15408-2013. Methods and means of ensuring security. Criteria for assessing the security of information technologies / Moscow: Standartinform. 2014;152. (In Russ)
11. GOST R 53114-2008. Information protection. Ensuring information security in the organization. Basic terms and definitions. 2008; 22. (In Russ)
12. Guidance document. Information technology security. The concept of assessing the compliance of automated systems with information security requirements: approved by FSTEC of Russia 2004. (In Russ)
13. The guiding document of the State Technical Commission. Information technology security. Criteria for assessing the security of information technologies: approved. By Order of the State Technical Commission No. 187 dated 06/19/2002. (In Russ)
14. Methodology for determining the risk of information security in information systems: approved by FSTEC of Russia 2015. (In Russ)
15. Kotsynyak M. A., Kuleshov I. A., Kudryavtsev A.M., Laut O. S. Cyberstability of ITCS. St. Petersburg, 2015. (In Russ)

Сведения об авторах:

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

Дровникова Ирина Григорьевна, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры автоматизированных информационных систем органов внутренних дел; drovnikova@mail.ru

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

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

Филь Елизавета Вадимовна, курсант 4 курса радиотехнического факультета; fillichkina@yandex.ru

Information about authors:

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

Irina G. Drovnikova, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Assoc. Professor, Department of Automated Information Systems of Internal Affairs Bodies; drovnikova@mail.ru

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

Victoria R. Romanova, adjunct of full-time education; romanovna_vika@inbox.ru

Elizaveta V. Fil, 4th year cadet of the Faculty of Radio Engineering; fillichkina@yandex.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 29.10.2022.

Одобрена после рецензирования/Revised 18.11.2022.

Принята в печать/Accepted for publication 18.11.2022.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 556.536:631.4

DOI: 10.21822/2073-6185-2022-49-4-58-66

Оригинальная статья /Original Paper

**Моделирование общего размыва неоднородных по крупности
несвязных грунтов в руслах рек**

М.Р. Магомедова, Р.А. Курбанов

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

Резюме. Цель. Целью исследования является разработка модели размыва неоднородных по крупности несвязных грунтов в руслах рек. **Методы.** Математическая модель разработана с использованием теории вероятностей и теории выбросов случайных процессов, с учетом нормального закона распределения горизонтальной и вертикальной составляющих мгновенных скоростей течения и Релеевского закона для распределения их максимумов. **Результат.** Выполнен статистический анализ различных моделей размыва неоднородных по крупности несвязных грунтов в руслах рек. **Вывод.** Основные принципы исследования различных моделей размыва неоднородных по крупности несвязных грунтов в руслах рек, а также структура, составленных на ее основе алгоритмов расчета и программ позволяют непрерывно совершенствовать методику расчета и вносить коррективы в соответствующие модули алгоритмов и программ.

Ключевые слова: диаметр частиц, удельный расход воды, мутность потока, моделирование, гранулометрический состав, скорость течения, расход наносов, турбулентный поток, регрессионная модель

Для цитирования: М.Р. Магомедова, Р.А. Курбанов. Моделирование общего размыва неоднородных по крупности несвязных грунтов в руслах рек. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022; 49(4):58-66 DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-4-58-66

Modeling of general erosion of heterogeneous non-cohesive soils in river beds

M.R. Magomedova, R.A. Kurbanov

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

Abstract. Objective. The aim of the study is to develop a model for the erosion of non-cohesive soils that are heterogeneous in size in river beds. **Method.** The mathematical model was developed using the theory of probability and the theory of outbursts of random processes, taking into account the normal law of distribution of the horizontal and vertical components of the instantaneous flow velocities and the Rayleigh law for the distribution of their maxima. **Result.** Statistical analysis of various models of erosion of non-cohesive soils heterogeneous in size in river channels was performed. **Conclusion.** The basic principles of studying various models of erosion of heterogeneous non-cohesive soils in river beds, as well as the structure of calculation algorithms and programs compiled on its basis, allow us to continuously improve the calculation method and make adjustments to the corresponding modules of algorithms and programs.

Keywords: particle diameter, specific water consumption, flow turbidity, modeling, particle size distribution, flow velocity, sediment flow, turbulent flow, regression model

For citation: M.R. Magomedova, R.A. Kurbanov. Modeling of general erosion of heterogeneous non-cohesive soils in river beds. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science. 2022; 49 (4): 58-66. DOI: 10.21822 /2073-6185-2022-49-4-58-66

Введение. Вопрос о транспортирующей способности русловых потоков, несмотря на многолетнюю историю, остается одной из актуальных задач динамики русловых потоков, так

как от ее решения зависит достоверность большинства инженерных прогнозов по деформации русел. Процессы размыва связных и несвязных грунтов наименее изучены в динамике русловых потоков. Это объясняется сложностью и изменчивостью физико-химической природы грунтов и трудностью постановки экспериментов, теоретического рассмотрения, особенно связных грунтов. Многочисленные исследования указанной проблемы чаще всего охватывали один из видов движения наносов или же ставили целью создание обобщенных уравнений транспорта, охватывающих все руслоформирующие донные и взвешенные наносы [1].

Ранее разработка методов расчета расхода руслоформирующих наносов в основном велась по следующим направлениям [2-8]:

- установление связи между расходом донных наносов и избытком влекущей силы, или касательного напряжения на дне потока;
- применение энергетического подхода к проблеме транспорта наносов, согласно которому расход наносов рассматривается как функция мощности, развиваемой потоком на единице площади дна и равной произведению влекущей силы на донную скорость потока;
- представление о пропорциональности твердого расхода скорости перемещения наносов и их концентрации в потоке;
- применение понятий и математических методов теории вероятностей и теории случайных процессов, позволяющих более полно описать стохастический характер процессов взаимодействия потока с частицами грунта.

Постановка задачи. Степень достоверности расчета расхода наносов и неразмывающих скоростей зависит от степени соответствия используемых математических моделей процесса размыва действительной физической природе явления, а также от полноты учета влияющих на эти процессы факторов.

Одной из основных задач изучения устойчивости русел рек является разработка рациональных методов установления допустимых неразмывающих скоростей водного потока. При достаточной мощности потока частицы грунта, формирующие дно русла, приходят в движение и уносятся, дно размывается, а при недостаточной мощности потока взвешенные частицы выпадают из взвеси на дно (рис. 1).

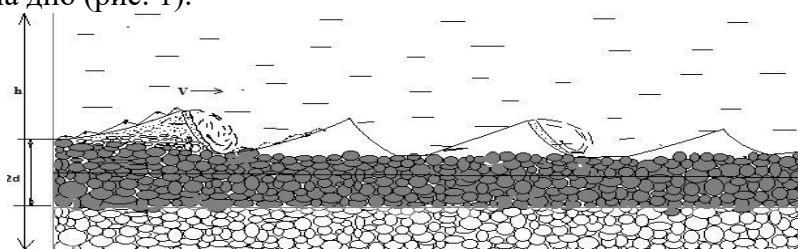


Рис. 1. Поверхностный слой частиц несвязного грунта

Fig. 1. Surface layer of non-cohesive soil particles

На переднюю грань частицы, расположенной на дне, поток оказывает положительное давление, а на тыловой создается вакуум. Так как абсолютное давление на переднюю грань больше, чем на тыловую, то среднее давление на нижнюю грань положительное. Кроме того, частицы могут оказаться под воздействием вихрей, возникающих в придонном слое потока, что также вызывает появление вертикально направленных импульсов. Это вихревое движение, обусловленное разностью скоростей в пограничном слое – основная причина размыва русла [1].

Сила, с которой водный поток воздействует на частицу на дне водотока, подвержена мгновенным изменениям из-за турбулентного характера движения. Природа турбулентного потока столь сложна, что, несмотря на ряд ценных работ ученых, нет полной ясности в вопросах о характере закономерностей пульсации. По современному представлению о процессе размыва несвязных грунтов, трогание частиц происходит при случайной совокупности различных факторов. Поэтому, учитывая случайный характер факторов, вызывающих процесс размыва, целесообразно для описания его применять методы математической статистики.

Под воздействием водного потока в результате вымыва мелких фракций на поверхности русла образуется естественная отмостка из крупных частиц, которая служит своеобразным защитным слоем, предотвращающим дальнейший размыв грунта. Наличие отмостки повышает сопротивляемость грунта размыву и поэтому позволяет в большинстве случаев назначать допускаемые неразмывающие скорости для этих грунтов, значительно превышающие допускаемые скорости для однородных грунтов с таким же средневзвешенным диаметром частиц.

Главными факторами, определяющими интенсивность процесса естественной отмостки являются: гранулометрический состав грунта и влияние на его изменение в процессе размыва гидравлических условий в потоке. Именно гидравлические условия предопределяют размеры отмываемых фракций, а уже доля этих фракций в исходном грунте определяется видом гранулометрической кривой. Окончательный состав отмостки, образующийся на поверхности грунта, существенным образом зависит от глубины размыва (толщины слоя, переработанного потоком грунта). Доля крупных частиц, а следовательно, средний диаметр частиц поверхностного слоя увеличивается с увеличением глубины размыва. Глубина же размыва регулируется степенью укрупнения поверхностного слоя.

Таким образом, явление естественной отмостки русла представляет собой сложный процесс, в котором все элементы (гидравлические условия, размер отмываемых фракций, степень укрупнения поверхностного слоя, глубина размыва) взаимосвязаны и не учет этих связей, естественно, приводит к значительным погрешностям [2, 6].

Вследствие чрезвычайного разнообразия форм, размеров, характера расположения частиц друг относительно друга все характеристики поверхностного слоя носят статистический характер; поэтому целесообразно применение для их определения методов теории вероятностей [2].

Существующие математические модели общего размыва речных русел базируются в основном на упрощенных гидравлических уравнениях (уравнения Шези, Сен-Венана), при этом для расчета размывающей и транспортирующей способности потока используются уравнения и формулы, разработанные для равномерного движения, и как правило, не обеспечивающие полного учета основных факторов взаимодействия потока и русла: статистических характеристик турбулентности потока, неоднородности гранулометрического состава руслоформирующих грунтов и наносов, изменчивости видов и состава грунтов по длине, ширине русла и глубине залегания и др [2].

Надежный прогноз общего размыва речных русел может быть осуществлен на основе реализуемых достоверных математических моделей процесса размыва речных русел быстро изменяющимся течением [3-5].

Разработка такой модели должна включать: моделирование неустановившегося движения воды в естественных речных руслах со сложной морфологией; моделирование процесса размыва неустановившимся потоком грунтов различного вида и состава; моделирование нестационарного процесса транспорта донных и взвешенных наносов.

Методы исследования. Расчет предельного размыва в заданном створе при сохранении постоянного уровня свободной поверхности производится исходя из уравнения стабилизации размыва [2].

Прекращение размыва происходит при выполнении равенства фактической и неразмывающей скорости потока и предельная деформация русла находится в результате численного решения следующих уравнений:

$$V = V_{H.доп}, \quad (1)$$

$$q = Vh = const, \quad (2)$$

где q – удельный расход воды, $м^3/см$; h – глубина потока, $м$; $V_{H.доп}$ – неразмывающая скорость потока, для несвязных грунтов определяемая по формуле:

$$V_{H.доп} = \left(\lg \frac{8.8}{d} \right) \sqrt{\frac{2m_1}{0.44\rho n_p} [g(\rho_s - \rho)D_{отм}]}, \quad (3)$$

где d – диаметр частиц грунта, м; ρ_c и ρ – плотность материала частиц грунта и воды, кг/м³, $D_{отм}$ – средний диаметр частиц отмытой, м m_1 , n_p , k_1 – соответственно коэффициенты условий работы русла, перегрузки и однородности сил сцепления.

Коэффициент перегрузки для частиц $d < 1$ мм определяем по эмпирической формуле:

$$n_p = 1 + \frac{1}{0,3 + [\nu^2 / (gd^3)]^{1/3}}, \quad (4)$$

для частиц $d \geq 1$ мм $n_p = 4$.

$$D_{отм} = d_{cp} + \int_0^{h_p} \delta h \int_{dh}^{d_{max}} \varphi_0(d) (1 - d_{cp} / d) \delta d \quad (5)$$

где d_{cp} и d_{max} – соответственно, средневзвешенный и максимальный диаметры частиц исходного грунта.

Алгоритм расчета допускаемой неразмывающей донной скорости реализован в подпрограмме Velocity [7-8]. Расчет допускаемой неразмывающей донной скорости, как для однородных, так и для неоднородных по крупности грунтов выполняется по формуле (3) в соответствии с признаком счета NEOD: если NEOD = 0 – однородный по крупности грунт, если NEOD = 1 – неоднородный по крупности грунт.

1. Определение коэффициента перегрузки: если $d < 1$ мм, то расчет осуществляем по формуле (4); для частиц $d \geq 1$ мм $n_p = 4$.

2. Проверяется условие: если NEOD = 0, то расчет допускаемой неразмывающей донной скорости осуществляется по среднему диаметру частиц d_{cp} , если NEOD = 1 – с учетом гранулометрического состава грунта.

3. Расчет максимального диаметра подвижных фракций русловых отложений, d_{km} выполняется на основе формулы (3) при равенстве фактической $\bar{u}_\Delta$ и неразмывающей скорости $V_{\Delta доп}$.

4. Определение относительного содержания подвижных фракций и их средний диаметр d_d осуществляется с помощью подпрограммы линейной интерполяции по массивам, характеризующим гранулометрический состав в подпрограмме Granul.

5. Конец расчета.

Специфической особенностью процесса размыва неоднородных по крупности несвязных грунтов является изменение в процессе размыва гранулометрического состава поверхностного слоя грунта. Для расчета параметров вычисляются следующие величины при изменении i от 1 до n , где n – количество фракций в грунте:

1. Средний диаметр фракции

$$d_{fp,i} = \frac{d_{min,i} + d_{max,i}}{2};$$

2. Ординаты интегральной гранулометрической кривой

$$P_i = \sum_{j=1}^i P_{fp,j},$$

изменяющиеся в пределах $0 < P_i < 1$;

3. Средневзвешенный диаметр частиц грунта

$$d_{cp} = \sum_{i=1}^n P_{fp,i} d_{fp,i}$$

Данный алгоритм реализован в подпрограмме Granul.

Далее расчет производим по отдельным участкам, предварительно определив распределение удельных расходов воды по ширине потока.

Расчет распределения удельных расходов воды построен на применении основного уравнения равномерного движения к отдельным участкам шириной ΔB_k и глубиной h_k (рис. 2):

$$Q_k = S_k \sqrt{J} \quad (6)$$

где Q_k – расход на k -м участке, м³/с, J – гидравлический уклон, S_k – модуль расхода элементарной расчетной струи, м³/с.

$$S_k = \Delta B_k h_k C_k \sqrt{h_k} \quad (7)$$

C_k – коэффициент Шези, вычисляемый по формуле Г.В. Железнякова

$$C_k = 0.5 \left[\frac{1}{n_\omega} - \frac{\sqrt{g}(1-lgh_k)}{0.13} \right] + \sqrt{0.25 \left[\frac{1}{n_\omega} - \frac{\sqrt{g}(1-lgh_k)}{0.13} \right]^2 + \frac{\sqrt{g} \left(\frac{1}{n_\omega} + \sqrt{g} lgh_k \right)}{0.13}} \quad (8)$$

где h_k – глубина потока на k – м участке, м; n_ω – коэффициент шероховатости, устанавливаемый по существующим нормативным документам (СНиП 2.06.03-85) или в результате расчета по гидравлическим параметрам потока в бытовом состоянии.

$$h_k = PVB - H_k \quad (9)$$

Удельный расход воды находят с учетом соотношения между расходом соответствующей струи и расходом всего потока:

$$\frac{Q_k}{Q} = \frac{S_k}{\sum_{k=1}^n S_k}, \quad (10)$$

$$q_k = \frac{Q_k}{\Delta B_k} = \frac{Q S_k}{\Delta B_k S_1} \quad (11)$$

где $S_1 = \sum_{k=1}^n S_k$; k – номер участка; n – число расчетных участков по ширине потока.

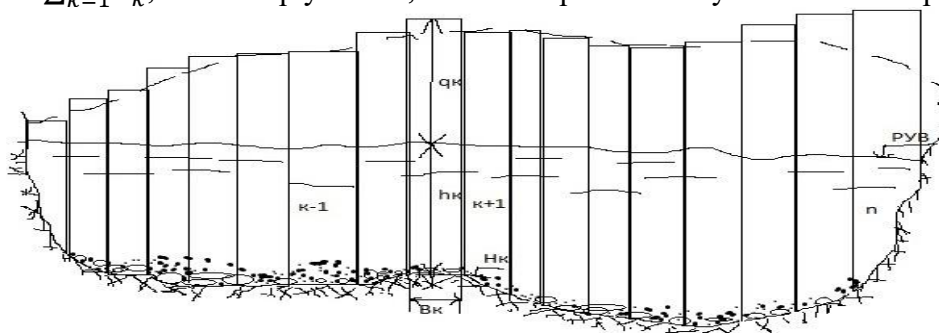


Рис. 2. Распределение удельных расходов воды и глубины размыва по ширине потока

Fig. 2. Distribution of specific water flow rates and erosion depth according to the width of the stream

Численный метод решения системы уравнений предельного размыва русла зависит от вида грунта, где для однородных грунтов (связных и несвязных) используется метод итераций, применительно к уравнению:

$$h_k = q_k / V_{H*доп}, \quad (12)$$

где $V_{H*доп} = \varphi(h_k)$. Расчет производится с точностью 0.00...0.01 h_k

Отметки размывого дна вычисляют по формуле:

$$H_k = PVB - h_k \quad (13)$$

В случае неоднородного по крупности несвязного грунта применяются два численных метода для решения системы уравнений предельного размыва.

Методом простых итераций определяют отметку дна русла, с которой начинается процесс естественной отмытки русла крупными фракциями грунта.

Этому соответствует неравенство $V_k < V_H$, V_H – неразмывающая скорость для частиц максимальной крупности, присутствующих в грунте, с учетом влияния неоднородности грунта на высоту выступов шероховатости:

$$V_H(d_{gg}) = \left(\frac{\lg 8.8 h_k}{d_{95}} \right) \sqrt{\frac{2m_1}{0.44 \rho n_1} g(\rho_r - \rho) d_{99}} \quad (14)$$

Расчет ведут по уравнению:

$$h_k = q_k / V_H(d_{gg}) \quad (15)$$

Так как на практике неоднородные грунты состоят из целой гаммы разнообразных по крупности частиц и поэтому заранее нельзя сказать, какие частицы войдут в состав отмытки, то расчет рекомендуется производить несколько раз, принимая в качестве расчетных фракций отмытки ряд значений крупных фракций в данной смеси по порядку.

Для расчета размыва русла при условии $V_k < V_H$ используется разностный метод, вследствие интегрального вида соотношения для среднего диаметра отмытки.

Для этого вводится сетка значений глубины потока с переменным шагом $0.01 \dots 0.001 h_{kj}$. На указанной сетке последовательно вычисляются значения фактической скорости потока по формуле:

$$V_{kj} = q_k / h_{kj} \quad (16)$$

Отметки дна размытого русла вычисляют по формуле:

$$H_{k,j+1} = H_{kj} - \Delta h_{kj} \quad (17)$$

На каждом шаге расчета производится сравнение фактической скорости потока с неразмывающей.

Расчет прекращается при наступлении неравенства $V_k < V_{H\text{доп.}}$

В соответствии с методикой разработан алгоритм расчета общего размыва русел при неустановившемся течении.

Обсуждение результатов. Выполнена статистическая обработка натурных и экспериментальных данных различных исследователей (В.Н. Гончарова, Г. Джильберта, А.М. Мухамедова, А.С. Пейнтела, В.Ф. Талмазы, И.В. Егиязарова, К.И. Россинского, И.И. Леви, В.С. Кнороза) по транспорту влекомых, полувзвешенных и взвешенных наносов.

По экспериментальным данным (714 значений), охватывающие большой диапазон крупности наносов ($d = 0,1 \dots 83$ мм) и скоростей течения ($V = 0,01 \dots 3$ м/с), отобранные согласно соответствующим критериям, построена точечная диаграмма в виде зависимости между удельными показателями расхода наносов и скорости, первый из которых изменяется в диапазоне $10^7 \dots 10^2$, а второй – в диапазоне $1 \dots 4$.

Для выбора регрессионной модели выполнялся визуальный анализ этой зависимости и сопоставление с различными регрессионными моделями.

При построении линии регрессии, исследованы пять моделей, которые при визуальной оценке лучше описывают экспериментальную зависимость: линейная модель, логарифмическая, экспоненциальная, гиперболическая (рис.3-6).

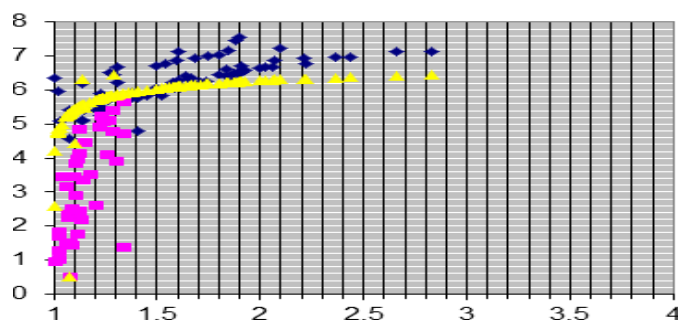


Рис. 3. Сопоставление с экспериментальными и натурными данными расчетных значений (логарифмическая модель)

Fig. 3. Comparison with experimental and field data of calculated values (logarithmic model)

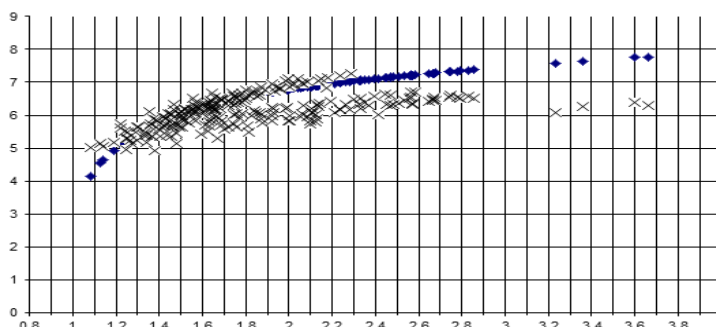


Рис. 4. Сопоставление с экспериментальными и натурными данными расчетных значений (линейная модель)

Fig. 4. Comparison with experimental and field data of calculated values (linear model)

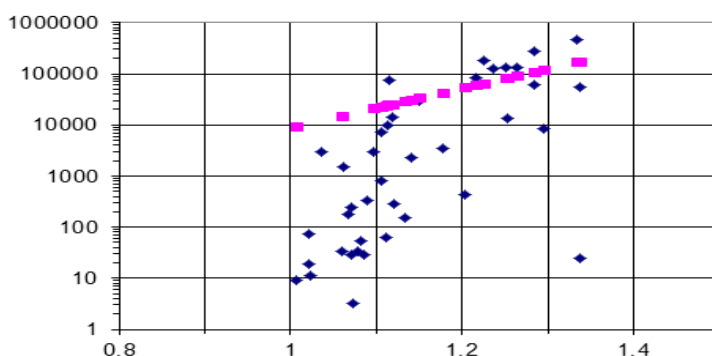


Рис. 5. Сопоставление с экспериментальными и натурными данными расчетных значений (гиперболическая модель)

Fig. 5. Comparison with experimental and field data of calculated values (hyperbolic model)

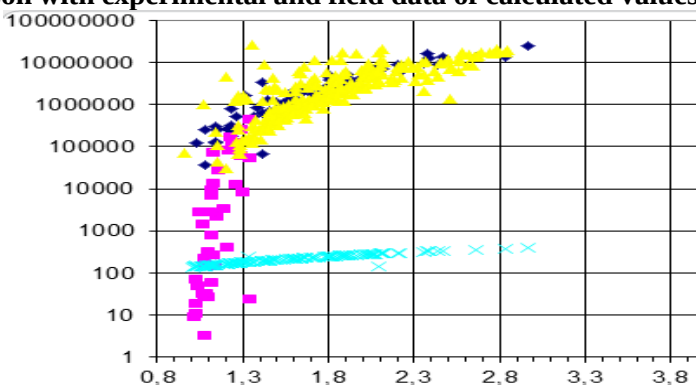


Рис. 6. Сопоставление с экспериментальными и натурными данными расчетных значений (экспоненциальная модель)

Fig. 6. Comparison with experimental and field data of calculated values (exponential model)

Таким образом, регрессионный анализ показал, что формула зависимости расхода наносов для всего исследованного диапазона должна иметь составной характер.

Сопоставление с экспериментальными данными расчетных значений расхода наносов в исследованном диапазоне параметров потока и грунта дало удовлетворительные результаты на определенном диапазоне расходов и скоростей.

Выполненный регрессионный анализ показал, что все использованные модели во всем исследованном диапазоне дают большую погрешность $S = 13.4$. В связи с большим диапазоном изменения крупности наносов и скоростей течения удовлетворительное соответствие экспериментальным данным некоторых моделей имеет место только в одном из диапазонов относительных скоростей $\bar{U}\Delta/V\Delta_{дон} = 1...1,3$ и $\bar{U}\Delta/V\Delta_{дон} = 1,2...3,2$. Наименьшее отклонение от экспериментальных данных дают гиперболическая модель 1 в диапазоне $\bar{U}\Delta/V\Delta_{дон} = 1,2...3,2$ и степенная модель в диапазоне $\bar{U}\Delta/V\Delta_{дон} = 1...1,3$ (табл. 1).

Таблица 1. Ошибки, полученные для различных моделей при сравнении экспериментальных данных с расчетными
Table 1. Errors obtained for various models when comparing experimental data with calculated ones

Регрессионные модели Regression Models	Среднеквадратическая погрешность, δ RMS error	Сумма квадратов отклонений, S Sum of squared deviations
$1 \leq \bar{U}\Delta/V\Delta_{дон} < 1.3$		
Степенная Power	0,000000789	0,000007
Линейная Linear	0,000000327	0,000007
Гиперболическая Hyperbolic	0,000000027	0,000001
Логарифмическая Logarithmic	0,000000327	0,000007
$1.2 \leq \bar{U}\Delta/V\Delta_{дон} < 3.2$		
Гиперболическая Hyperbolic	0,000000023	0,0000101
Гиперболическая 2 Hyperbolic 2	0,072	31,122
Экспоненциальная Exponential	0,021	6,723

Вывод. Разработка надежных методов прогноза размыва неоднородных по крупности несвязных грунтов должна вестись по пути возможно более полного приближения расчетной схемы процесса размыва к его действительной физической сущности. Это отчасти может быть достигнуто в результате учета изменения в процессе размыва гранулометрического состава поверхностного слоя грунта, а также использования в качестве характеристики исходного гранулометрического состава размываемого грунта – закона распределения размеров его частиц, который является наиболее полной характеристикой гранулометрии грунта [9-12].

В зависимости от типа решаемой задачи в исследованных моделях к приведенным уравнениям добавляются то или иное количество уравнений, необходимое для замыкания системы. Такой подход, позволяющий получить решение задач в окончательном виде, применим в тех случаях, когда возможна схематизация живых сечений речного потока в виде однообразного поперечного профиля на большом протяжении, а также при однородном геологическом строении ложа водотока.

Между тем, неоднородность по крупности, являясь характерной особенностью большинства встречающихся на практике несвязных грунтов, оказывает во многих случаях существенное влияние на процесс размыва вследствие возникновения естественной отмытки русла [2, 15]. Поэтому изложенная выше методика учета неоднородности грунта при учете размыва русел, а также транспортирующей способности потока может быть применена при решении задач прогноза общего размыва русел значительной протяженности, сложенных неоднородными по крупности несвязными грунтами.

Библиографический список:

1. Мирцхулава Ц.Е. Размыв русел и методика оценки их устойчивости. М., 1967, 180 с.
2. Магомедова А.В. Эрозионные процессы в руслах рек и каналов. – М.: ВЗПИ, 1990. – С.88-108.
3. Алексеевский Н.И. Транспорт влекомых наносов при развитой структуре руслового рельефа // Метеорология и гидрология. 1990. № 9, с. 100-105.
4. Bagnold R.A. Bed load transport by natural rivers // Water Recurs. Moscow, Res. 1977. 13. 2. P. 303-312.
5. Клавен А.Б., Копалиани З.Д. Экспериментальные исследования и гидравлическое моделирование речных потоков и руслового процесса. – СПб.: Нестор-История, 2011. – С. 103–107.
6. Kopaliani Z.D. Problem of bed load discharge assessment in rivers. Proc. 10-th Inter Symp. on River Sedimentation. Moscow, 2007, vol. 3, pp. 175–181.
7. Магомедова М.Р. Математическое моделирование движения придонных наносов в открытых руслах: Махачкала: Алеф, Овчинников М.А., 2014. – 137 с.
8. Григорьян О.П., Магомедова М.Р. Имитационное математическое моделирование распространения взвешенных частиц для определения зон повышенной мутности при оценке ущерба водным биологическим ресурсам реки Черек // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки – 2016. –Т.42, - №3 - С.106-109.
9. Гончаров В.Н. Основы динамики русловых потоков. – Л.: Гидрометеиздат, 1954. – 453 с.
10. Караушев А.В. Транспорт наносов в открытых потоках // Труды ГГИ. – 1951. – Вып. 28. – С. 78-122.
11. Леви И.И. Динамика русловых потоков. – Л.: Госэнергоиздат, 1957. – 247 с.
12. Россинский К.И., Дебольский В.К. Речные наносы. М.: Наука.– 1980. – 218 с.
13. Brian W.D., Peter F.F. Grain Size, Sediment Transport Regime, and Channel Slope in Alluvial Rivers. The Journal of Geology, 2011, vol. 106, no. 6, pp.662-673.
14. Benoit C., Magnus L.A General formula for non-cohesive bed load sediment transport. Estuarine, Coastal and Shelf Science. 2005, pp.251-258.
15. Магомедова М.Р. Расчетная модель движения твердых частиц в придонных турбулентных потоках // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019. –Т.46, - №2 - С.98-107.

References:

1. Mirtskhulava Ts.E. Erosion of channels and methods for assessing their stability. M., 1967; 180. (In Russ)
2. Magomedova A.V. Erosion processes in the channels of rivers and canals. M.: VZPI, 1990; 88-108. (In Russ)
3. Alekseevskiy N.I. Transport of traction sediments with a developed structure of the channel relief. *Meteorology and Hydrology*. 1990; 9: 100-105. (In Russ)
4. Bagnold R.A. Bed load transport by natural rivers. *Water Recurs*. Moscow, Res. 1977; 13. 2.:303-312.
5. Klaven A.B., Kopaliani Z.D. Experimental studies and hydraulic modeling of river flows and channel process. St. Petersburg: Nestor-Istoriya, 2011; 103-107. (In Russ)
6. Kopaliani Z.D. Problem of bed load discharge assessment in rivers. Proc. 10th International Symp. on River Sedimentation. Moscow, 2007; 3: 175–181.
7. Magomedova M.R. Mathematical modeling of the movement of bottom sediments in open channels: Makhachkala: Alef, Ovchinnikov M.A., 2014; 137. (In Russ)
8. Grigoryan O.P., Magomedova M.R. Simulation mathematical modeling of the spread of suspended particles to determine areas of increased turbidity in assessing damage to water biological resources of the Cherek River. *Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Sciences*. 2016; 42 (3): 106-109. (In Russ)
9. Goncharov V.N. Fundamentals of channel flow dynamics. L.: *Gidrometeoizdat*, 1954;453. (In Russ)
10. Karaushev A.V. Sediment transport in open streams. *Proceedings of the GGI*. 1951; 28: 78-122. (In Russ)
11. Levi I.I. Dynamics of channel flows. L.: *Gosenergoizdat*, 1957; 247. (In Russ)
12. Rossinsky K.I., Debolsky V.K. River deposits. M.: *Nauka*. 1980; 218. (In Russ)
13. Brian W.D., Peter F.F. Grain Size, Sediment Transport Regime, and Channel Slope in Alluvial Rivers. *The Journal of Geology*, 2011; 106(6):662-673.
14. Benoit C., Magnus L.A General formula for non-cohesive bed load sediment transport. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2005; 251-258.
15. Magomedova M.R. Calculation model of the movement of solid particles in near-bottom turbulent flows. *Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Sciences*. 2019; 46(2):98-107. (In Russ)

Сведения об авторах:

Магомедова Милада Руслановна, кандидат технических наук, доцент; n-guseinova@mail.ru

Курбанов Рашид Алибекович, аспирант, старший преподаватель кафедры «Нефтегазовое дело»; kurbanovrd@yandex.ru

Information about authors:

Milada R. Magomedova, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof.; n-guseinova@mail.ru

Rashid A. Kurbanov, Post-graduate Student, Senior Lecturer, Department "Oil and gas business"; kurbanovrd@yandex.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 29.09.2022.

Одобрена после рецензирования/ Revised 30.10.2022.

Принята в печать/Accepted for publication 30.10.2022.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 004.896

DOI: 10.21822/2073-6185-2022-49-4-67-77

Оригинальная статья /Original Paper

Метод декомпозиции глобальной задачи на локальные задачи посредством процесса коллективного принятия решений в роевых робототехнических системах

В.И. Петренко, Ф.Б. Тебueva, В.О. Антонов, С.С. Рябцев, А.С. Павлов

Северо-Кавказский федеральный университет,
355017, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1, Россия

Резюме. Цель. Целью работы является повышение эффективности процесса распределения задач за счет предварительной декомпозиции и определения приоритетов задач посредством процесса коллективного принятия решений (КПР) в роевых робототехнических системах (РРТС). **Метод.** Декомпозиция задач осуществляется с помощью гибридной стратегии принятия решений, мажоритарном принципе смены мнений с применением технологии распределенного реестра для распространения мнений среди агентов РРТС и агрегации накопленных знаний о среде функционирования. Элементом научной новизны является предложенная процедура КПР, обеспечивающая возможность оценки приоритета выполнения задач, что в свою очередь, позволяет повысить эффективность функционирования агентов РРТС. **Результат.** Для апробации предложенного метода была выполнена его программная реализация на языке программирования C++. Для проведения экспериментов был использован сценарий коллективного восприятия агентами РРТС в специализированной имитационной среде ARGoS. **Вывод.** Метод, реализованный с помощью предложенных в работе решений, оказался эффективнее, чем метод на основе жадного алгоритма. Предложенные решения можно применять не только в РРТС, но и любых других робототехнических системах с децентрализованным управлением, предназначенных для мониторинга и контроля параметров среды.

Ключевые слова: роевая робототехническая система, декомпозиция задач, коллективное принятие решений, достижение консенсуса, технологии распределенного реестра

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации для молодых ученых – кандидатов наук (№ МК-300.2022.4 Разработка методов и алгоритмов для системы управления роем БПЛА при выполнении гетерогенных задач).

Для цитирования: В.И. Петренко, Ф.Б. Тебueva, В.О. Антонов, С.С. Рябцев, А.С. Павлов. Метод декомпозиции глобальной задачи на локальные задачи посредством процесса коллективного принятия решений в роевых робототехнических системах. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022; 49(4):67-77. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-4-67-77

Method for decomposition a global task into local tasks through the process of collective decision making in swarm robotic systems

V.O. Petrenko, F.B. Tebueva, V.O. Antonov, S.S. Ryabtsev, A.S. Pavlov

North-Caucasus Federal University,
1 Pushkina Str., Stavropol 355017, Russia

Abstract. Objective. The purpose of the work is to increase the efficiency of the process of task allocation through preliminary decomposition and prioritization of tasks based on the process of collective decision-making (CDM) in swarm robotic systems (SRS). **Method.** Task decomposition implemented using a hybrid decision-making strategy, the majority principle of changing opinions using distributed registry technology for disseminating opinions among SRS agents and aggregating accumulated knowledge about the functioning environment. An element of scientific novelty is the proposed SRS procedure, which provides the possibility of assessing the priority of tasks, which in turn

improves the efficiency of the SRS agents. **Result.** Software implementation of the proposed method made in the C++ programming language. For the experiments, the scenario of collective perception by SRS agents in a specialized simulation environment ARGoS was used. **Conclusion.** The method implemented using the solutions proposed in the work turned out to be more efficient than the method based on the greedy algorithm. The proposed solutions can be used not only in SRS, but also in any other robotic systems with decentralized control, designed to monitor and control environmental parameters.

Keywords: swarm robotics, task decomposition, collective decision-making, consensus achievement, distributed ledger technology

Acknowledgments. This work was financially supported by a grant from the President of the Russian Federation for young scientists - candidates of science (No. MK-300.2022.4 Development of methods and algorithms for the UAV swarm control system when performing heterogeneous tasks).

For citation: V.O. Petrenko, F.B. Tebueva, V.O. Antonov, S.S. Ryabtsev, A.S. Pavlov. Method for decomposition a global task into local tasks through the process of collective decision making in swarm robotic systems. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science. 2022; 49 (4): 67-77. DOI: 10.21822 /2073-6185-2022-49-4-67-77

Введение. Групповая робототехника активно внедряется в повседневную жизнь и находит свое применение во многих практических задачах: аварийно-спасательных операциях, космических полетах, военных действиях, точечном земледелии. Наличие большого количества прикладных задач, решение которых характеризуется высокой трудоемкостью, неопределенностью и требованием работы в масштабе реального времени в условиях воздействия противоречивых, а также часто меняющихся факторов обуславливает непрерывно растущий интерес к групповой робототехнике.

В настоящее время в мире для решения подобных задач используются либо отдельные роботы, либо централизованные робототехнические системы. Однако, эти системы не могут эффективно и быстро выполнять поставленные задачи. Решение данной проблемы возможно за счет использования децентрализованных робототехнических систем. При этом наиболее значимым барьером для широкого использования таких робототехнических систем является недостаточное развитие методов и алгоритмов декомпозиции глобальной целевой задачи на локальные задачи, которые позволят повысить эффективность распределения и выполнения задач агентами системы.

В работе [1] предложены три варианта декомпозиции задач в группе роботов с использованием технологий облачных вычислений: на основе линейного распределения, роевого взаимодействия и синтеза решений. Приведены обобщенные результаты экспериментальной проверки разработанных решений, однако, стоит отметить, что авторы этой работы не представили информации о модельной задаче и параметрах моделирования.

Авторы работы [2] предложили квазиоптимальный алгоритм декомпозиции и распределения задач, представив эту задачу в виде задачи о потоке минимальной стоимости. Полученные результаты моделирования подтверждают эффективность предложенного решения по сравнению с аналогами. В статье [3] представлен метод декомпозиции и распределения задач для группы роботов при решении задач максимального охвата территории. Метод основан на понятии «зоны ответственности», которая представляет собой часть среды, рассматриваемую как атомарную задачу, закрепленную за одним роботом. Зоны ответственности определяются в соответствии с текущим состоянием робота (уровень заряда аккумуляторной батареи, дальность действия бортовых сенсоров и т.д.), при этом учитываются такие характеристики среды, как рельеф местности, а также наличие препятствий. Распределение задач происходит таким образом, что каждому роботу последовательно добавляются наиболее подходящие зоны ответственности, при этом основным критерием выбора задач является расстояние от зоны ответственности до конкретного робота. Также предложен механизм индексации зон ответственности робо-

тов, что позволяет оптимизировать последовательность выполнения задач. Недостатком рассмотренных решений является то, что они предназначены только для централизованных систем.

В статье [4] предложена система управления группой роботов, включающая в себя алгоритмы декомпозиции, распределения задач и планирования траектории для выполнения задач. Особенностью системы является формирование оптимальной последовательности выполнения задач при их декомпозиции за счет использования алгоритмов оптимизации и планирования пути. Недостатком предложенной системы является высокая вычислительная сложность ввиду перебора множества возможных решений. В работе [5] представлен параллельный алгоритм декомпозиции и распределения задач, направленный на повышение эффективности совместного функционирования группы роботов. Авторы предложили использовать структуру данных «дерева распределения задач», с помощью которой обеспечивается итеративная процедура, включающая в себя этапы как декомпозиции задачи на ряд более простых задач, так и назначение агентов для выполнения этих задач. Результаты моделирования демонстрируют эффективность предложенного алгоритма, однако, как отмечают авторы статьи, его применение ограничено только статической средой функционирования группы роботов.

Перспективным подходом к разработке методов децентрализованной декомпозиции глобальной целевой задачи в групповой робототехнике является использование технологий распределенного реестра, в частности, блокчейн [6]. Преимущества использования блокчейн обусловлены сходством базовых принципов организации групп роботов с принципами построения распределенных систем хранения и обработки данных, такими как децентрализация, одноранговость, масштабируемость [7]. Вдохновившись работами [6,7] предлагается провести исследование данной технологии для распределенных вычислений задачи декомпозиции и обработки данных.

На примере задачи мониторинга лесных пожаров предлагается рассмотреть возможность обработки спутниковых снимков для формирования областей мониторинга зоны чрезвычайных ситуаций (ЧС) среди агентов роя беспилотных летательных аппаратов (далее «роевой робототехнической системы», РРТС).

Постановка задачи. В данной работе рассматриваются вопросы обеспечения эффективности процесса распределения задач за счет предварительной декомпозиции и определения приоритета задач РРТС при проведении мониторинга со следующими ограничениями:

- группа роботов представлена роем БПЛА, в дальнейшем РРТС в соответствии с характеристиками согласно терминологии в работах [8,9];

- в РРТС должна быть возможность масштабирования в процессе работы, т.е. роботы могут подключаться и отключаться в течение работы, вновь прибывшие роботы сразу записываются в очередное обновление локальной копии реестра, при этом вопросы византийской отказоустойчивости [10–12], авторизации и аутентификации агентов [13,14] в данной работе не рассматриваются;

- на вход предлагаемых решений поступают сцена, представляющая собой разбитую на области некоторый снимок, захватывающий зону мониторинга; вопросы разбиения снимка на области в данной работе не рассматриваются;

- в данной работе изменяющиеся и измеряемые факторы рассматриваются в диапазоне значений экспертной оценки (низкий, средний, высокий). Следует отметить, что данный подход выбран для удобства апробации предложенных решений, реальные значения приоритетов необходимо выбирать исходя из конкретной задачи, требований стандартов и наличия специализированной техники у группы по ликвидации отдельно взятой ЧС.

Целью работы является повышение эффективности процесса распределения задач за счет предварительной декомпозиции и определения приоритетов задач РРТС посредством внедрения процесса КПП.

Гипотеза исследования состоит в том, что выполнение декомпозиции с определением приоритетов задач за счет обработки данных процесса КПП при мониторинге некоторой обла-

сти позволит снизить среднее затраченное время и пройденное агентами РРТС расстояние при распределении и выполнении целевых задач.

Исходные данные: R – РРТС состоящая из n агентов система (объект исследования); X – множество входных параметров, которое включает в себя изображения заданной территории H и координаты границ этой территории x ; Y – множество выходных параметров; Z – множество внутренних параметров системы; E – множество параметров среды (условий функционирования); $e_1, \dots, e_m$ – дестабилизирующие параметры среды, где: e_1 – количество очагов возгорания; e_2 – наличие людей / жилых домов; e_3 – количество горючих материалов. Q – множество показателей качества/эффективности функционирования системы, к которому может относиться время, расстояние, количество задач и т.д., $q_1, \dots, q_n$ – контролируемые показатели качества/эффективности (предмет исследования).

Содержательная (вербальная) постановка научной задачи: разработать метод M повышения эффективности функционирования РРТС по показателям среднего затраченного времени агентами РРТС для выполнения задач и пройденного агентами расстояния в диапазоне значений входных и выходных параметров (X, Y) системы за счет варьирования значений внутренних параметров Z в условиях изменения параметров среды $e_1, \dots, e_m (e_j \in E, j = 1 \dots m)$.

Формальную постановку научной задачи можно сформулировать следующим образом, найти метод M такой, что:

$$M: \langle R, X, Y, Z, E, Q \rangle \rightarrow \{\Delta q_1, \dots, \Delta q_k\} \mid \forall \Delta q_i > 0, q_i \in Q, i = 1, \dots, k,$$

при этом: $\Delta q_i = q_i^{\Pi} - q_i^{\Delta}, i = 1, \dots, k$, где индекс «д» значит «до использования метода», индекс «п» – «после использования метода».

Исследование процесса КПП рассматривалась на примере задачи мониторинга лесных пожаров, которая сводится к сценарию коллективного восприятия агентам РРТС некоторой зоны ЧС, классическая постановка задачи коллективного восприятия в роевой робототехнике рассмотрена в работе [15].

Альтернативами в процессе КПП A_i в данном случае служат суждения о качестве параметров (низкий, средний, высокий), изменяющихся факторах внешней среды E , к которым следует отнести: наличие людей и построек, наличие горючего материала и количество очагов возгорания. При проведении экспериментов изменяющиеся факторы внешней среды E представлены цветами на некоторой сцене, разделенной координационной сеткой, полученной на основании спутниковых снимков и базовых сведений об исследуемой среде.

Цель РРТС состояла в том, чтобы достичь консенсуса и принять коллективное решение и выбрать на основе данных о внешней среде одну из нескольких альтернатив A_i (голосование за то, что определенный параметр внешней среды обладает определённым качеством на сцене, что необходимо для эффективного распределения задач) при наличии изменения с течением времени качества альтернатив среды, которое в экспериментах данной статьи изменялось случайным образом в диапазоне каждые 100 раундов процесса КПП. В качестве меры измерения сложности выполнения роем БПЛА задачи используется соотношение между наиболее распространённым цветом (качеством альтернативы) и прочими координационными зонами на сцене (данное соотношение выбрано в виду необходимости сопоставления сложности экспериментальных прогнозов). Сложность рассчитывается по формуле [16]:

$$Complexity = \frac{\sum_{N_1}^{N_i} P_i \setminus P_i^{max}}{P_i^{max}} / (N_i - 1),$$

где i – порядковый номер цвета, N_i – количество цветов, P_i – процентное соотношение - го цвета на сцене, P_i^{max} – процентное соотношение наиболее распространённого цвета на сцене, а $\sum_{N_1}^{N_i} P_i \setminus P_i^{max}$ – сумма процентных соотношений всех цветов без P_i^{max} .

В случае равновероятного распределения цветов. в качестве P_i^{max} можно выбрать любой цвет. Сложность задачи можно варьировать, изменяя соотношение между процентами белых плиток и других цветов (чем меньше дестабилизирующих изменяющихся параметров, тем легче

определить список задач). В простой задаче разница между процентом белых и черных плиток должна быть велика, в сложной напротив большая.

Сцена проведения эксперимента представляет из себя обработанный спутниковый снимок, ограниченную 4 сторонами и размером $S_{scene} = X \times X \text{ м}^2$, в текущих экспериментах сцена квадратная $2 \times 2 \text{ м}^2$. Рой БПЛА состоит из $N_r = 15$ агентов, перемещающихся по карте, размеченной цветными клетками, и способных воспринимать качество обозначенных альтернатив с помощью набора сенсорных устройств, в данных экспериментах осуществлялось по средством считывания цвета поверхности. Траектория движения каждого робота представляет собой линию, которая чередует движение по прямой и вращение для перехода к следующей линии координационной сетки. В начале эксперимента генерируется сцена заданной сложности.

Внешний вид экспериментальной сцены, приведен на рис. 1. Для оценки эффективности представленных решений используется показатель «среднее затраченное время агентами РРТС для выполнения задач и пройденное агентами расстояние».

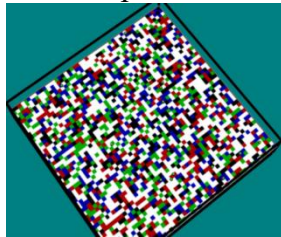


Рис.1. Пример экспериментальной сцены

Fig.1. An example of an experimental scene

Методы исследования. Схематическое представление предлагаемого метода показано на рис. 2.

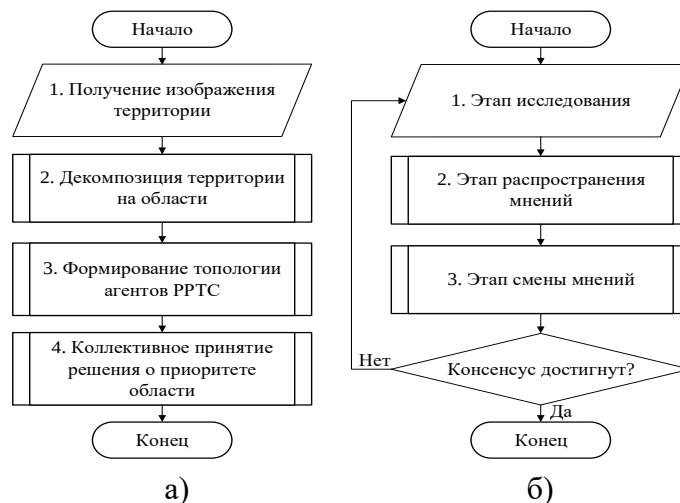


Рис.2. Схематическое представление: а) этапов предлагаемого метода; б) процедуры коллективного принятия решения для назначения приоритета областям заданной территории
Fig.2. Schematic representation of: a) stages of the proposed method; b) collective decision-making procedures for assigning priority to areas of a given territory

На первом этапе в качестве входных данных агенты РРТС принимают от оператора изображение заданной территории H , получаемое со спутника. На втором этапе для точного определения приоритетности выполнения задач предлагается проведение актуализации информации о состоянии территории H посредством бортовых датчиков и сенсоров агентов РРТС. Для этого территория H декомпозируется на ряд областей $H = h_1, \dots, h_k$, которые можно представить в виде k квадратов, размеры которых подбираются исходя из зоны покрытия бортовых средств сбора данных (область видимости агентов v_i). Так, если представить область видимости агентов РРТС v_i в виде окружности с диаметром d , то измерения сторон a областей $h_\theta, \theta = 1, \dots, k$ не должны превышать d , то есть $a < d$.

По мнению авторов настоящей работы, такая декомпозиция обеспечит равномерное по-

крытие агентами РРТС исследуемой территории H , при этом пересечение областей видимостей соседних агентов позволит компенсировать воздействия различных помех, шумов и случайных ошибок, которые возможны в процессе сбора данных о состоянии среды. В случае превышения количества областей k над количеством агентов n предлагается использовать методы планирования пути или траектории движения [17,18], где опорными точками пути W будут центры областей h_θ .

На третьем этапе агенты РРТС формируют некоторый заданный строй [19,20], который должен поддерживаться на протяжении всего исследования территории H . Иллюстрация выполнения первых трех этапов предлагаемого метода агентами РРТС представлена на рис. 3.

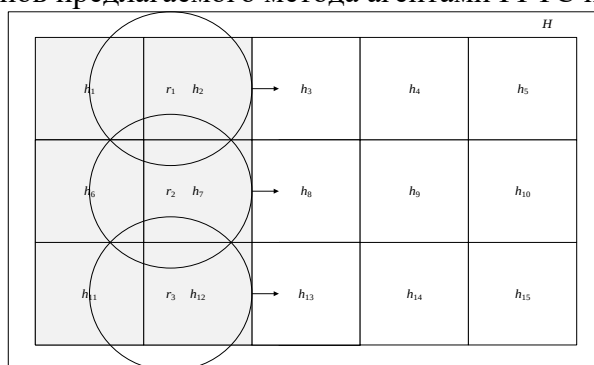


Рис. 3. Иллюстрация исследования агентами РРТС декомпозированной территории H

Fig. 3. Illustration of the study of the decomposed territory H by swarm agents

На рис. 3 окружностями показаны области видимости агентов РРТС, квадратами – области исследуемой территории, из которых фигуры со светло-серой заливкой обозначают исследованные области, без заливки – еще не исследованные.

На четвертом этапе происходит процедура коллективного принятия решения о назначении приоритета исследуемой области агентами РРТС. Рассмотрим подробнее суть этой процедуры. В рамках выполнения задач мониторинга можно выделить несколько подходов к стратегии КПР агентами РРТС [21].

– в случаях, когда РРТС необходимо иметь полное представление о среде традиционно применяется осторожная стратегия, согласно которой агенты РРТС не принимают решение до тех пор, пока не будут иметь полное представление обо всей среде функционирования. Данный подход, с одной стороны, является самым точным, а с другой стороны может быть медлительным;

– в случае, когда требуется быстро принимать решения применяют рискованную стратегию, согласно которой агенты меняют свое мнение и принимают решение при достаточном кворуме, даже не имея полного представления о среде функционирования.

В рамках решения задачи повышение качества выполнения мониторинга в настоящем исследовании актуальным является применение смешанного подхода как стратегии принятия решения – задается некоторый минимум количества накопленных сведений о среде. Это обусловлено причинами необходимости наличия максимально достоверных сведений о состоянии ЧС с одной стороны, а с другой стороны, в условиях мониторинга ЧС нет времени на облет всей среды каждым агентом. В течение всего времени движения агент подсчитывает время, в течение которого наблюдался признак среды A_i . По итогу выполнения процедуры оценки вычисляется качество признака. По итогу выполнения процедуры оценки, отдельный робот принимает решение о том, какое значение какая из представленных альтернатив преобладает в среде.

В качестве измеряемых и изменяющихся альтернатив среды в статье рассматриваются E – множество параметров среды (условий функционирования); $E = \{e_1, \dots, e_m\}$ – изменяющиеся параметры среды, где: e_1 – количество очагов возгорания; e_2 – наличие людей / жилых домов; e_3 – горючие материалы.

В рамках моделирования и апробации использовался следующий подход оценке приори-

тета для декомпозиции задачи. Каждый из трех признаков имеет три степени оценки: низкий, средний и высокий. Для удобства присвоим число каждой степени оценки: – 0 для низкий; – 1 для средний; – 2 для высокий. Таким образом, будем рассматривать правила как последовательность троичного кода, и определим следующий подход композиции, если S – сумма разрядов в последовательности равна 6-5, то это очень высокая степень приоритета, если 0-1 то очень низкая степень приоритета, 2 – низкая, 3 – средняя, а 4 – высокая, представим в табл. 1 результат композиции правил.

Таблица 1. Определение приоритета области
Table 1. Determination of area priority

№	Критерий оценки Evaluation criterion			S	№	Критерий оценки Evaluation criterion			S	№	Критерий оценки Evaluation criterion			S
	e_1	e_2	e_3			e_1	e_2	e_3			e_1	e_2	e_3	
1	0	0	0	0	10	1	0	0	1	19	2	0	0	2
2	0	0	1	1	11	1	0	0	1	20	2	0	1	3
3	0	0	2	2	12	1	0	2	3	21	2	0	2	4
4	0	1	0	1	13	1	1	0	2	22	2	1	0	3
5	0	1	1	2	14	1	1	1	3	23	2	1	1	4
6	0	1	2	3	15	1	1	2	4	24	2	1	2	5
7	0	2	0	2	16	1	2	0	3	25	2	2	0	4
8	0	2	1	3	17	1	2	1	4	26	2	2	1	5
9	0	2	2	4	18	1	2	2	5	27	2	2	2	6

Таким образом, на выходе 5 характеристик, сведенных к цветам на сцене в табл. 2: очень низкий, низкий, средний, высокий очень высокий.

Таблица 2. Характеристики приоритета задач
Table 2. Characteristics of task priority

№	Величина Value	Значение приоритета Priority value	Цвет сцене Scene color
1	очень низкий very low	0-20 (0,0,2)	белый white
2	низкий short	20-40 (0,2-0,4)	зеленый green
3	средний middle	40-60 (0,4-0,6)	синий blue
4	высокий tall	60-80 (0,6-0,8)	черный black
5	очень высокий very tall	80-100 (0,8-1)	красный red

Таким образом, отдельно взятые агенты имеют все необходимые для расчета величины приоритета области показатели. Следует отметить, что данный подход выбран для удобства проверки метода, реальные значения приоритетов необходимо выбирать исходя из конкретной задачи, требований стандартов и наличия специализированной техники у группы по ликвидации отдельно взятой ЧС.

На этапе распространения мнения применяется метод на основе применения технологии распределенного реестра [22], предназначенный для того чтобы агенты агрегировали накопленные знания из локальных версий базы данных (БД) в единую версию распределенного реестра. В состоянии распространения агент с мнением i распространяет свое мнение среди соседей. Агент записывает мнения соседей (а также своё текущее) и обновляет свою базу данных (БД). БД обновляется в соответствии с меткой временем, происходит слияние локальных копий БД в единую версию. По окончании стадии распространения агенты применяют механизм принятия решения для определения коллективного решения и разделения задач. В качестве механизма смены мнения в данной статье применяется модель большинства, согласно которой агент проверяет актуальную версию БД в распределенном реестре и качество признаков каждой альтернативы, затем агент меняет свое мнение на наиболее частый вариант по правилу большинства:

$$a_{\hat{q}}, \hat{q} = \arg \max P_q.$$

Таким образом, агент меняет свое мнение на самое распространенное мнение согласно распределенному реестру. После смены мнения агент сообщает о своем мнении (о наиболее распространенном признаке A_i), подсчитываются голоса и при наличии 80% проголосовавших за один признак агентов консенсус считается достигнутым, иначе необходимо перейти заново на стадию исследования среды.

Таким образом, после завершения оценки приоритета областей h_θ следует процедура распределения задач, в качестве которой может быть использован метод на основе жадного алгоритма [23].

Его суть заключается в выборе каждым агентом r_i , $i = 1, \dots, n$ ближайшей свободной задачи t_j (каждая задача t_j , $j = 1, \dots, m$ может быть закреплена только за одним агентом PPTC), а выбор последующих задач выполняется путем поиска ближайшей незанятой другими агентами задачи. В настоящей работе в качестве основного критерия выбора задачи t_j рассматривается приоритет p_θ выполнения задач, расположенных в области h_θ . В том случае, если в h_θ есть несколько задач, то, согласно оригинальной идее метода, выбирается ближайшая свободная задача t_j .

Обсуждение результатов. Для апробации предложенного метода была выполнена его программная реализация на языке программирования C++. Для проведения экспериментов использована имитационная среда ARGoS [24] и метод достижения консенсуса, описанный в [22]. При проведении симуляции был использован компьютер со следующими характеристиками: процессор Intel Core i7-8550U 1.8GHz, 8Gb RAM. Используются параметры моделирования, указанные в табл. 3.

Таблица 3. Параметры моделирования
Table 3. Simulation parameters

Наименование параметра Parameter name	Значение Value	Наименование параметра Parameter name	Значение Value
Количество агентов Number of Agents	15	Количество альтернатив выбора Number of Choice alternatives	5
Количество экспериментов Number of Experiments	100	Размер сцены Stage Size	100 на 100 м.
Максимальная скорость движения Maximum travel Speed	5 м/с	Сложность сцены Scene complexity	85%
Количество задач Number of Tasks	100	Распределение цветов на сцене Distribution of colors on the stage	40:15:15:15:15
Количество областей Number of Regions	32	Кворум достижения консенсуса Consensus quorum	12

Для проведения исследований был использован сценарий коллективного восприятия с параметрами моделирования, указанными в табл. 2. Моделирование предполагало серию экспериментов из 100 симуляций для 15 агентов.

Результаты на рис. 4 показывают эффективность предлагаемых решений по сравнению с жадным алгоритмом: по показателям среднего затраченного времени агентами PPTC для выполнения задач (а) и пройденного агентами расстояния (б).

Согласно полученным в ходе моделирования данным предложенное решение обеспечивает повышение эффективности по показателю среднего затраченного времени в среднем на 9,98 %, а по показателю пройденного агентами расстояния – на 9,12%.

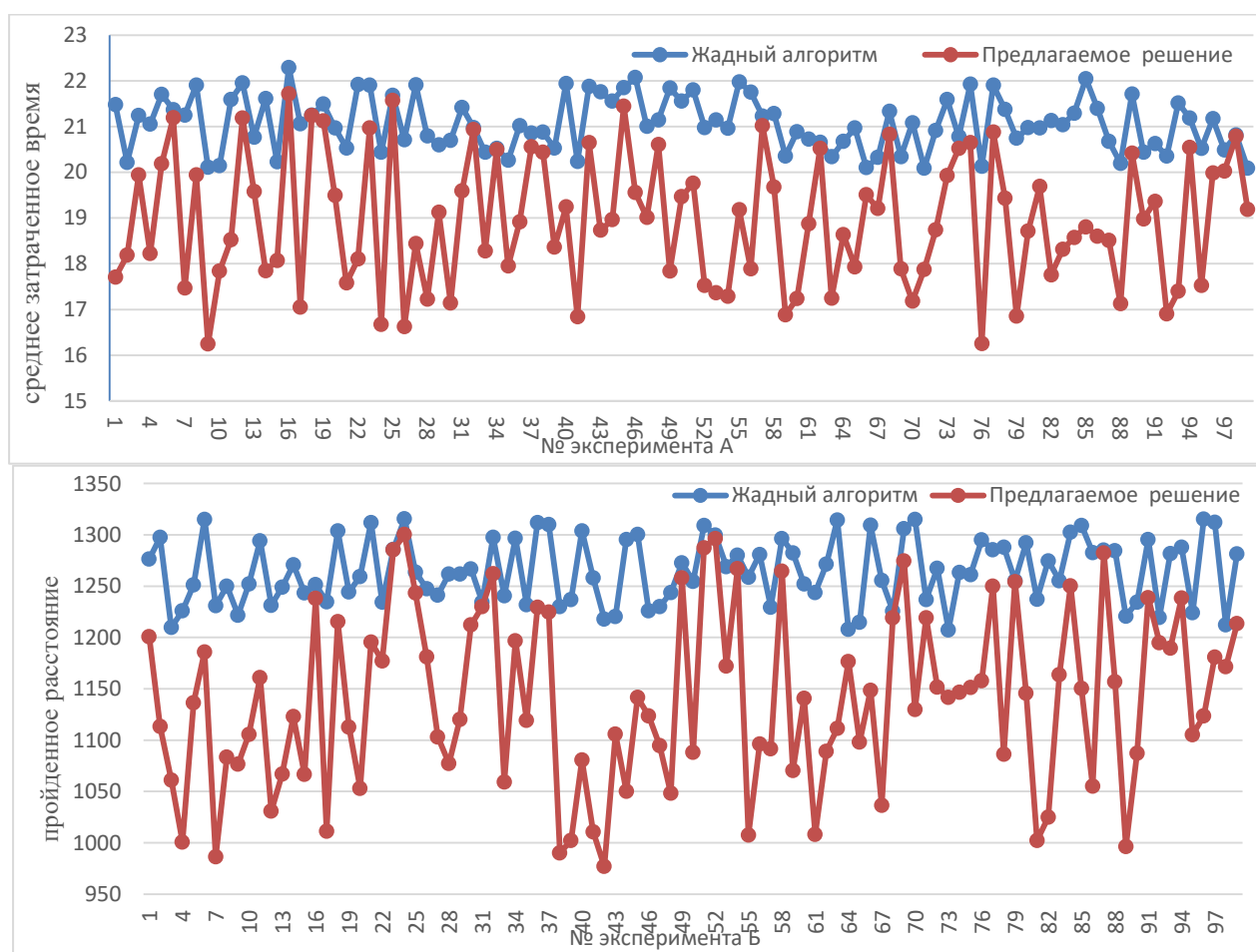


Рис. 4. Сравнение предложенного метода с жадным алгоритмом по показателям:
 а) среднее затраченное время агентами РРТС для выполнения задач;
 б) пройденное агентами расстояние

Fig. 4. Comparison of the proposed method with the greedy algorithm in terms of:
 а) the average time spent by swarm agents to complete tasks; б) distance traveled by agents

Вывод. В данной статье предложен метод декомпозиции глобальной целевой задачи на локальные на основе данных процесса КПР. Предложенные решения базируются на гибридной стратегии принятия решений и мажоритарном принципе смены мнений, а распространение мнения среди агентов реализовано с помощью метода, основанного на применении распределенного реестра. Экспериментальные результаты показывают, что эффективность предлагаемого метода превосходит метод на основе применения жадного алгоритма по показателю среднего затраченного времени в среднем на 9,98 %, а по показателю пройденного агентами расстояния – на 9,12%.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что основная гипотеза исследования является подтвержденной и выполнение декомпозиции с определением приоритетов задач за счет обработки данных процесса КПР при мониторинге некоторой территории, позволили снизить среднее затраченное время и пройденное расстояние агентами РРТС при распределении и выполнении целевых задач.

Практическая значимость предлагаемых решений заключается в возможности их реализации в виде комплекса программ и использования для комплексного мониторинга зон распространения ЧС с помощью РРТС, а также в возможном применении в других системах, отвечающих за контроль параметров среды с децентрализованным управлением.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации для молодых ученых – кандидатов наук (№ МК-300.2022.4 Разработка методов и алгоритмов для системы управления роем БПЛА при выполнении гетерогенных задач).

Библиографический список:

1. Даринцев О.В., Мигранов А.Б. Декомпозиция задач в группе роботов с использованием технологий облачных вычислений // Труды Института механики им. Р.Р. Мавлютова УНЦ РАН. 2017. Т. 12, № 1. С. 83–88.
2. Solovey, K., Bandyopadhyay, S., Rossi, F., Wolf, M. T., Pavone, M.. Fast Near-Optimal Heterogeneous Task Allocation via Flow Decomposition // 2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). 2021. P. 9117–9123.
3. Lavendelis E. Responsibility Area Based Task Allocation Method for Homogeneous Multi Robot Systems // Ad-hoc Networks Wireless. Lect. Notes Comput. Sci. 2015. V. 8629. P. 232–245.
4. Motes, J., Sandström, R., Lee, H., Thomas, S., Amato, N. M. Multi-Robot Task and Motion Planning With Subtask Dependencies // IEEE Robot. Autom. Lett. 2020. V. 5, № 2. P. 3338–3345.
5. Adamey E., Oğuz A.E., Özgüner Ü. Collaborative Multi-MSA Multi-Target Tracking and Surveillance: a Divide & Conquer Method Using Region Allocation Trees // J Intell Robot Syst. 2017. V. 87. P. 471–485.
6. Strobel V., Castelló Ferrer E., Dorigo M. Blockchain Technology Secures Robot Swarms: A Comparison of Consensus Protocols and Their Resilience to Byzantine Robots // Front. Robot. AI. 2020. V. 7. P. 1–22.
7. Петренко В.И., Рябцев С.С., Тебуева Ф.Б., Стручков И.В. Метод достижения консенсуса для роя роботов относительно наиболее часто встречающейся особенности окружающей среды на основе технологии блокчейн // Фундаментальные проблемы информационной безопасности в условиях цифровой трансформации, Ставрополь, 2020. С. 249–254.
8. Zakiev A., Tsoy T., Magid E. Swarm robotics: Remarks on terminology and classification // Lect. Notes Comput. Sci. Springer Verlag, 2018. V. 11097. P. 291–300.
9. Dudek G., Jenkin M., Milios E., Wilkes D. A taxonomy for multi-agent robotics. Auton. Robots. 1996. V. 3, № 4. P. 375–397.
10. Lamport L., Shostak R., Pease M. The Byzantine Generals Problem // C. Trans. Program. Lang. Syst. 1982; 4(3): 382–401.
11. Petrenko V.I., Tebueva, F.B., Ryabtsev S.S., Antonov V.O., Struchkov I.V. Data Based Identification of Byzantine Robots for Collective Decision Making // 2022 13th Asian Control Conf. IEEE, 2022. P. 1724–1727.
12. Tebueva F., Ryabtsev S., Struchkov I. A method of counteracting Byzantine robots with a random behavior strategy during collective design-making in swarm robotic systems // E3S Web Conf. EDP Sciences, 2021. V. 270. P. 1–6.
13. Петренко В.И., Тебуева Ф.Б., Павлов А.С., Стручков И.В. Анализ рисков нарушения информационной безопасности в роевых робототехнических системах при масштабировании численности агентов // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2022. № 2 (58). С. 92–109.
14. Павлов А.С., Свистунов Н.Ю., Петренко В.И., Тебуева Ф.Б., Линец Г.И., Мочалов В.П. Система разграничения доступа к информационным ресурсам роевых робототехнических систем в условиях наличия внедренных вредоносных агентов // Информатизация и связь. 2022. № 5. С. 121–130.
15. Valentini G., Brambilla D., Hamann H., Dorigo M. Collective perception of environmental features in a robot swarm // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). Springer Verlag, 2016. V. 9882. P. 65–76.
16. Рябцев С.С. Метод выявления вредоносных роботов на основе данных процесса коллективного принятия решений в роевых робототехнических системах // Системы управления, связи и безопасности. 2021. № 5. С. 224–258.
17. Павлов А.С. Методика планирования траектории движения группы мобильных роботов в неизвестной замкнутой среде с препятствиями // Системы управления, связи и безопасности. 2021. № 3. С. 38–59.
18. Юдинцев Б.С. Синтез нейросетевой системы планирования траекторий для группы мобильных роботов. // Системы управления, связи и безопасности. 2019. № 4. С. 163–186.
19. Иванов Д. Я. Формирование строя группой беспилотных летательных аппаратов при решении задач мониторинга // Известия ЮФУ. Технические науки. 2012. № 4 (129). С. 219–224.
20. Веселов Г.Е., Лебедев Б.К., Лебедев О.Б. Управление формированием и поддержанием строя автономных беспилотных летательных аппаратов // Системный синтез и прикладная синергетика. сборник научных работ X Всероссийской научной конференции. Ростов-на-Дону, Таганрог, 2021. С. 104–108.
21. Hamann H. Swarm Robotics: A Formal Approach. Springer International Publishing. 2018. – 210 p.
22. Petrenko V.I., Tebueva F.B., Ryabtsev S.S., Gurchinsky M.M., Struchkov I.V. Consensus achievement method for a robotic swarm about the most frequently feature of an environment // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. Krasnoyarsk, Russia, 2020. P. 42025.
23. Koubaa A., Bennaceur H., Chaari I., Trigui S., Ammar A., Sriti M., Alajlan M., Cheikhrouhou O., Javed Y. Robot Path Planning and Cooperation - Foundations, Algorithms and Experimentations // Studies in Computational Intelligence. 2014. V. 772. P. 1–160.
24. Pinciroli C., Trianni V., O'Grady R., Pini G., Brutschy A., Brambilla M., Mathews N., Ferrante E., Caro G. D., Ducatelle F., Birattari M., Gambardella L., Dorigo M. ARGoS: A modular, parallel, multi-engine simulator for multi-robot systems // Swarm Intelligence. 2012. V. 6. № 4. P. 271–295.

References:

1. Darintsev O.V., Migranov A.B. Decomposition of tasks in a group of robots using cloud computing technologies. [Trudy Instituta mehaniki im. R.R. Mavljutova UNC RAN] *Proceedings of the Institute of Mechanics R.R. Mavlyutov UC RAS*. 2017; 12(1): 83–88. (In Russ)
2. Solovey K., Bandyopadhyay S., Rossi F., Wolf M. T., Pavone M. Fast near-optimal heterogeneous task allocation via flow decomposition. *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. 2021; 9117–9123.
3. Lavendelis E. Responsibility Area Based Task Allocation Method for Homogeneous Multi Robot Systems. *Ad-hoc Networks Wireless. Lect. Notes Comput. Sci.* 2015; 8629: 232–245.
4. Motes J., Sandström R., Lee H., Thomas, S., Amato, N. M. Multi-robot task and motion planning with subtask dependencies. *IEEE Robot. Autom. Lett.* 2020; 5(2): 3338–3345.
5. Adamey E., Oğuz A.E., Özgüner Ü. Collaborative Multi-MSA Multi-target tracking and surveillance: a divide & conquer method using region allocation trees. *J Intell Robot Syst.* 2017; 87: 471–485.
6. Strobel V., Castelló Ferrer E., Dorigo M. Blockchain technology secures robot swarms: a comparison of consensus protocols

and their resilience to byzantine robots. *Front. Robot. AI*. 2020; 7: 1–22.

7. Petrenko V.I., Tebueva F.B., Ryabtsev S.S., Struchkov I.V. A method for achieving consensus for a swarm of robots on the most frequently occurring feature of the environment based on blockchain technology. *Fundamental problems of information security in the context of digital transformation*, Stavropol, 2020; 249–254. (In Russ)

8. Zakiev A., Tsoy T., Magid E. Swarm robotics: Remarks on terminology and classification. *Lect. Notes Comput. Sci. Springer Verlag*, 2018;11097: 291–300.

9. Dudek G., Jenkin M., Milios E., Wilkes D. A taxonomy for multi-agent robotics. *Auton. Robots*. 1996; 3(4): 375–397.

10. Lamport L., Shostak R., Pease M. The byzantine generals problem. *C. Trans. Program. Lang. Syst.* 1982; 4(3): 382–401.

11. Petrenko, V.I., Tebueva, F.B., Ryabtsev S.S., Antonov V.O., Struchkov I.V. Data based identification of byzantine robots for collective decision making. *2022 13th Asian Control Conf. IEEE*, 2022; 1724–1727.

12. Tebueva F., Ryabtsev S., Struchkov I. A method of counteracting Byzantine robots with a random behavior strategy during collective design-making in swarm robotic systems. *E3S Web Conf. EDP Sciences*, 2021; 270: 1–6.

13. Petrenko V.I., Tebueva F.B., Pavlov A.S., Struchkov I.V. Analysis of the information security of swarm robotics in the process of scaling the number of agents. *Casp. J. Control High Technol. Astrakhan State University*, 2022; 2: 92–109. (In Russ)

14. Pavlov A.S., Svistunov N.U., Petrenko V.I., Tebueva F.B., Linets G.I., Mochalov V.P. A system for restricting access to information resources of swarm robotic systems in the presence of embedded malicious agents. *Informatization and communication*, 2022; 5: 121–130. (In Russ)

15. Valentini G., Brambilla D., Hamann H., Dorigo M. Collective perception of environmental features in a robot swarm. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*. Springer Verlag, 2016; 9882: 65–76.

16. Ryabtsev S. A method for detecting Byzantine robots based on data from the collective decision-making process in swarm robotic systems. *Systems of Control, Communication and Security*. 2021; 5: 224–258. (In Russ)

17. Pavlov A.S. Methodology for planning the trajectory of a group of mobile robots in unknown closed environment with obstacles. *Systems of Control, Communication and Security*. 2021; 3: 38–59. (In Russ)

18. Yudinsev B.S. A path planning system synthesis for a group of mobile robots based on neural network. *Systems of Control, Communication and Security*. 2019; 4: 163–186. (In Russ)

19. Ivanov D. Ya. Formation of structure by group of unmanned aerial vehicles in tasks of monitoring. *Izvestiya SFedU. engineering sciences*. 2012; 4(129): 219–224. (In Russ)

20. Veselov G.E., Lebedev B.K., Lebedev O.B. Management of the formation and maintenance of the formation of autonomous unmanned aerial vehicles. *System synthesis and applied synergetics. Collection of scientific papers of the X All-Russian scientific conference*. Rostov-on-Don, Taganrog, 2021; 104–108. (In Russ)

21. Hamann H. Swarm Robotics: A Formal Approach. *Springer International Publishing*. 2018; 210.

22. Petrenko V.I., Tebueva F.B., Ryabtsev S.S., Gurchinsky M.M., Struchkov I.V. Consensus achievement method for a robotic swarm about the most frequently feature of an environment. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations*. Krasnoyarsk, Russia, 2020; 42025.

23. Koubaa A., Bennaceur H., Chaari I., Trigui S., Ammar A., Sriti M., Alajlan M., Cheikhrouhou O., Javed Y. Robot Path Planning and Cooperation - Foundations, Algorithms and Experimentations. *Studies in Computational Intelligence*. 2014; 772: 1–160.

24. Pinciroli C., Trianni V., O'Grady R., Pini G., Brutschy A., Brambilla M., Mathews N., Ferrante E., Caro G. D., Ducatelle F., Birattari M., Gambardella L., Dorigo M. ARGoS: A modular, parallel, multi-engine simulator for multi-robot systems. *Swarm Intelligence*; 2012; 6(4): 271–295.

Сведения об авторах:

Петренко Вячеслав Иванович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой Института цифрового развития, vipetrenko@ncfu.ru.

Тебueva Фариза Биляловна, доктор физико-математических наук, доцент, заведующая кафедрой компьютерной безопасности Института цифрового развития, ftebueva@ncfu.ru.

Антонов Владимир Олегович, кандидат технических наук, доцент кафедры компьютерной безопасности Института цифрового развития; ant.vl.02@gmail.com.

Рябцев Сергей Сергеевич, старший преподаватель кафедры компьютерной безопасности Института цифрового развития; nalfartom@yandex.ru.

Павлов Андрей Сергеевич, старший преподаватель кафедры компьютерной безопасности Института цифрового развития; losde5530@gmail.com.

Information about the authors:

Vyacheslav I. Petrenko, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Head of the Department of Organization and Technology of Information Security; vipetrenko@ncfu.ru.

Fariza B. Tebueva, Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Assoc. Prof., Head of the Department of Computer Security; ftebueva@ncfu.ru.

Vladimir O. Antonov, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Department of Computer Security; ant.vl.02@gmail.com.

Sergey S. Ryabtsev, Senior Lecturer, Department of Computer Security; nalfartom@yandex.ru.

Andrey S. Pavlov, Senior Lecturer, Department of Computer Security; losde5530@gmail.com.

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/ Received 06.11.2022.

Одобрена после рецензирования/ Revised 20.11.2022.

Принята в печать/ Accepted for publication 20.11.2022.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 004.056

DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-4-78-84

Обзорная статья/ Review article

**Анализ технологий защиты информации для использования
в инфраструктуре предприятия**

А.Д. Попов, А.Д. Попова

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

Резюме. Цель. Целью исследования является анализ современных технологий информационной безопасности для решения задач защиты информации инфраструктуры предприятия. **Метод.** Исследование основано на методах системного анализа, синтеза, дедукции. **Результат.** Проведен анализ и раскрыты особенности технологии защиты информации с целью возможного использования в инфраструктуре предприятия. Проведен анализ отечественного и зарубежного программного обеспечения для практического использования. **Вывод.** Результаты проведенного анализа раскрывают особенности использования средств защиты информации в инфраструктуре предприятия в целях противодействия современным векторам атак на информационные ресурсы.

Ключевые слова: программные средства, информационная безопасность, системы защиты информации

Для цитирования: А.Д. Попов, А.Д. Попова. Анализ технологий защиты информации для использования в инфраструктуре предприятия. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022; 49(4):78-84. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-4-78-84

Analysis of information security technologies for use in the enterprise infrastructure

A.D. Popov, A.D. Popova

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

Abstract. Objective. The purpose of the study is to analyze modern information security technologies for solving the problems of protecting information in the enterprise infrastructure. **Method.** The study is based on the methods of system analysis, synthesis, deduction. **Result.** The analysis was carried out and the features of information protection technology were disclosed for the purpose of possible use in the infrastructure of the enterprise. The analysis of domestic and foreign software for practical use is carried out. **Conclusion.** The results of the analysis reveal the features of using information protection tools in the enterprise infrastructure in order to counteract modern vectors of attacks on information resources.

Keywords: software, information security, information security systems

For citation: A.D. Popov, A.D. Popova. Analysis of information security technologies for use in the enterprise infrastructure. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Science. 2022; 49(4):78-84. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-4-78-84

Введение. Современный мир, любая сфера деятельности человека характеризуется использованием различных служб и сервисов, обеспечивающих работу производственных систем. В связи с этим нарушение их нормальной работы могут быть связаны с техническими неполадками, неквалифицированными действиями персонала, преднамеренными злонамеренными действиями и т.д. Все это может привести к потере денежных средств, компрометации документов, нарушению штатного функционирования систем и т.д., что естественным образом может при-

вести к различным негативным последствиям. Следует отметить, что инфраструктура и технологический стек предприятий, государственных учреждений, частных компаний зависит в основном от стоящих перед ними задач, что требует фактически индивидуальных подходов к разработке эксплуатационных регламентов, разработке нормативных актов, выбора организационных мер защиты информации и т.д. Развитие подобных служб, сервисов и в целом информационных технологий в настоящее время осуществляется колоссальными темпами. В связи с этим происходит углубленная декомпозиция задач, которые должны осуществляться программным обеспечением. Данный подход используется при разработке высоконагруженных, критичных и распределенных систем.

Постановка задачи. На практике сложность проектирования и эксплуатации подобных систем вызвана трудностью конфигурирования, контроля правильности разработки программного обеспечения, выделения ресурсов, сбора метрик, подготовленностью персонала и т.д. Также немаловажным фактором являются условия эксплуатации, а именно выбор в пользу облачных ресурсов или же физического сервера. С учетом того, что подобных программных продуктов может быть ни один десяток, масштаб всех неопределенностей может привести к кризисной ситуации. При решении подобных задач могут быть преднамеренно упущены множество нюансов, которые с одной стороны облегчат разработку, внедрение и эксплуатацию, но с другой стороны задачи и цели, стоящие перед персоналом, могут быть достигнуты не в полной мере. Зачастую подобные упущения влекут за собой нарушения информационной безопасности, некорректную работу программного обеспечения, появление уязвимых мест и т.д.

Меры защиты в организации применяются в соответствии с критичностью обрабатываемой информации. Также немаловажным фактором при их выборе является структура организации, используемые технические и программные средства и др. В целом все подходы к защите информации определяются политикой информационной безопасности.

В связи с увеличением количества компьютерных атак и появлением новых векторов их реализации встает острый вопрос выявления, анализа и хранения информации по ним. Для решения данной задачи поверх всех традиционных средств защиты информации внедряются программные средства автоматизации обнаружения угроз и реагирование на них. В настоящее время для решения задач информационной безопасности в автоматизированные системы различного уровня сложности внедряются средства защиты информации. Данные средства можно разделить на два больших класса одни представляют уже готовое техническое устройство, другие реализованы в программном исполнении.

Программные средства можно разделить на локальные(антивирусы, системы защиты информации от несанкционированного доступа и др.) устанавливаемые на автоматизированное рабочее место и распределенные(Extended Detection and Response (XDR), Security information and event management (SIEM), Security Orchestration, Automation and Response (SOAR) и др.) устанавливаемые на сервер и имеющие агентов исполнителей. Естественно, что данные программные средства выполняют различные задачи, но все же объединены одной главной целью «Защита информации». Локальные, представлены широким классом инструментов защиты информации. Мировому сообществу известны множество методологических работ, нормативных актов, регламентирующих их работу [1-3]. Средства защиты информации в распределенном исполнении также имеют множество научных работ, но нормативных актов, регламентирующих их работу, практически нет [4,5]. Это обусловлено тем что законодатель не успевает за технологическим прогрессом, а тем более рассмотреть каждую инфраструктуру в определенной конфигурации отдельно. Также специалист, принимающий архитектурные решения в организации, не может сразу определить какие распределенные решения по защите информации необходимы, будут ли они избыточными, нужно вообще их внедрять и т.д. В связи с этим задача статьи заключается в анализе технологий и программных средств их реализующих, позволяющих распределённой(комплексно) защитить организацию от современных компьютерных атак и угроз информационной безопасности.

Методы исследования. Сложность и многовекторность компьютерных атак повлияла на развитие программных продуктов для их противодействия. Данный факт говорит о все большей неопределенности при выборе программных продуктов. Наиболее распространенный класс рассматриваемых систем являются SIEM [6, 7]. Данные системы предназначены для мониторинга, сбора и обработки различных событий информационной безопасности. Принцип функционирования SIEM систем заключается в том, что данные о безопасности информационных систем собираются в реальном времени из различных источников и по результатам их обработки предоставляются отчеты в едином интерфейсе. Полученные сведения предоставляются аналитику безопасности, и в последующем исследуются на наличие характерных особенностей, соответствующих инцидентам информационной безопасности. SIEM обеспечивает защиту от различного рода атак, а также имеет следующие возможности, представленные на рис. 1.

SIEM системы довольно быстро завоевывают рынок средств защиты информации и представляют собой технологический гибрид по сбору информации со всевозможных источников, начиная с сетевых устройств заканчивая контейнерами. Анализ архитектур современных SIEM систем показал, что разработчики опираются на различные технологические концепции и решения (на основе виртуальных машин, на основе микросервисной архитектуры, предоставляют программное обеспечение как сервис в облачной инфраструктуре), что дает большую гибкость в выборе того или иного решения. Более подробно архитектурные решения типовых SIEM систем будут рассмотрены в последующих статьях.



Рис. 1 Функциональные возможности SIEM систем
Fig. 1. Functionality of SIEM systems

Обсуждение результатов. При внедрении в организации подобных систем возникает ряд трудностей, связанных с обучением сотрудника, отвечающего за контроль и эксплуатацию подобной системы. Зачастую у организации встает выбор эксплуатировать SIEM систему на собственных ресурсах, либо на облачных (преимущественно используются большими организациями), или же отдать полное право контроля в аутсорсинговую компанию, которая функционирует в рамках Security Operation Center (SOC) центр обеспечения компьютерной безопасности. В случае если выбор падает в пользу аутсорсинговой компании, то значительная часть защитных функций будет в руках сторонней организации, что с одной стороны снимает проблему с вводом в штат нового сотрудника, но в тоже время увеличивает риски утечки информации. Каждая из стратегий имеет свои плюсы и минусы, которые следует учитывать. На мировом рынке SIEM систем представлены следующие программные решения IBM QRadar SIEM, McAfee Enterprise Security Manager, Micro Focus ArcSight 2021.1, FortiSIEM (Fortinet). На отечественном рынке представлено множество SIEM систем, к ним можно отнести: MaxPatrol, RuSIEM, KOMRAD Enterprise SIEM, Kaspersky Unified Monitoring and Analysis Platform и др. Данные решения представляет широкий спектр программных компонентов, позволяющих выявлять отклонения от нормальной работы системы и др. Представленные системы активным образом развиваются, добавляя в продукты новые технологические решения. SIEM системы положили начало технологиям поведенческого анализа пользователей User and entity behavior

analytics (UEBA), оркестрации безопасности и автоматического реагирования Security orchestration and automation response (SOAR).

Первая основывается на искусственном интеллекте и методах глубокого обучения для изучения моделей человеческого поведения. UEBA обнаруживает угрозы, определяя действия пользователя или систем, которые отклоняются от нормы. Чаще всего используется для отслеживания и обнаружения подозрительного трафика, несанкционированного доступа к данным, а также вредоносной активности в компьютерной сети или на ее узлах. Данная технология помогает выявить целевые атаки, попытки мошенничества, внутренних нарушителей. UEBA применяет аналитические методы для анализа данных, характеризующих поведение пользователя и событий, возникающих в операционной системе [8,9]. Полученные данные сравниваются с базовым поведением, что позволяет обнаружить аномалии, а также провести оценку риска и определить, допустимы ли отклонения. Если оценка превышает пороговый уровень, то система оповещает аналитиков безопасности. Данная технология активно интегрируется в SIEM, но все же представляет собой отдельный инструмент. К самым распространенным можно отнести Fortinet, Gurucul UEBA, Splunk, Cynet, LogRhythm, Rapid7, Exabeam.

SOAR представляют собой набор программных решений и инструментов, предназначенных для просмотра и сбора данных различной природы [10,11]. Это позволяет провести подробный анализ на основе человеческого и машинного обучения с целью определения приоритетов для действий по реагированию на инциденты. Человеческим фактором является проведение машинного обучения, объяснение полученных результатов в особенности, когда они противоречат здравому смыслу. SOAR решает три основные задачи: управление угрозами и уязвимостями, автоматизация операций реагирования на инциденты безопасности. Это достигается путем сбора данных об угрозах из различных источников и автоматизированного реагирования на них.

По итогам анализа были выявлены следующие программные решения: Swimlane SOAR, Splunk Phantom, Security Vision IRP/SOAR, Cortex XSOAR, Siemplify, FortiSOAR, RVision IRP и Eplat4m SOAR. Если разница между SIEM и UEBA очевидна, то с SOAR нет. SOAR системы стремятся уменьшить количество задач, стоящих перед аналитиком безопасности (путем интеллектуального управления угрозами и уязвимостями) и автоматизировать их, а также объединить все возможные решения информационной безопасности с целью недопущения ложных срабатываний. В отличие от SIEM SOAR является более продвинутым технологическим решением, которое позволяет получать события из классических инструментов информационной безопасности, а также более быстро проводить судебную экспертизу и т.д. (рис. 2), где IDS/IPS (Intrusion Detection System/ Intrusion Prevention System) – системы обнаружения и предотвращения вторжений.



Рис. 2. Функциональные особенности SOAR систем
Fig. 2. Functional features of SOAR systems

Существует еще один класс технологических решений таких, как Endpoint detection and response (EDR) [12,13]. Данные системы призваны предупреждать аналитиков безопасности о злонамеренной активности, а также обеспечивать быстрое расследование и сдерживание атак на конечные точки. При помощи агентов с устройств собирается информация о выполнении про-

цессов, журналах событий, запущенных приложениях, сетевой активности, аутентификации пользователей в системе с последующим ее корреляцией и анализом. EDR позволяют выполнять автоматические и ручные действия по сдерживанию, например, автоматически останавливать скомпрометированные процессы, изолировать и отключать подозрительные учетные записи и устройства. Зачастую EDR интегрируются с SIEM системами. На рынке представлены следующие инструменты Kaspersky Endpoint Detection and Response Expert, Symantec Endpoint Protection, RSA NetWitness Endpoint, CrowdStrike Falcon Insight, Cybereason Endpoint Detection and Response, FireEye Endpoint Security. Развитием EDR стали системы класса XDR [14].

Вторые в отличие от первых осуществляют активный поиск угроз, которые не могут быть выявлены обычными средствами защиты информации, такими как брандмауэры или системами антивирусного мониторинга. Это достигается введением дополнительных сканеров на сетевые узлы, сканеров поведенческого анализа, инструментов обобщения данных сети, устройств и др. В системах XDR сбор событий осуществляется не только на устройствах, но, а также на сетевых сенсорах, межсетевых экранах, шлюзах безопасности, облачных серверах, IDS/IPS, SIEM и др. Обобщенно основами задачами подобных систем является комплексное обнаружение угроз, аналитика, реагирование и расследование атак.

Представленные технологии схожи между собой, но в классическом составе они содержат меньше функций чем XDR, а именно:

- EDR обеспечивают защиту информации на уровне устройств без возможности контроля сетевых и облачных служб.
- SIEM собирают и анализируют информации в локальной сети без возможности реагирования.
- UEBA проводят поведенческий анализ пользователей, приложений и устройств без возможности реагирования на аномалии.
- SOAR работают в основном по сигнатурам и типовым сценариям реагирования и охватывают большую часть инфраструктуры, но не обеспечивая проактивную защиту.

Перспективной классом средств защиты информации является Cybersecurity Mesh Architecture (CSMA) технология комплексной безопасности, которая представляет собой выделенный уровень инфраструктуры для облегчения взаимодействий между всеми возможными средствами защиты информации, что позволяет противостоять всем видам атак [15]. Основной идеей организации работы CSMA систем является политика нулевого доверия. Она применяет индивидуальные подходы к аутентификации на всех функционирующих устройствах и используемых ресурсах (не доверяет по умолчанию).

Подобная практика устраняет пробелы классической политики безопасности, ориентированной на контроль устройств в локальной сети, а также позволяет обнаруживать и устранять угрозы на ранней стадии. Системами типа CSMA выделяются четыре вспомогательных уровня, каждый из которых имеет свою зону ответственности. Главная задача которых, обеспечить взаимодействие всех технологий защиты информации (рис. 3).

Аналитика безопасности. Данный уровень направлен на сбор, агрегацию и анализ данных о безопасности из различных источников. На их основе SIEM и SOAR идентифицируют потенциальные угрозы и осуществляют противодействие.

Распределенная регистрация. Уровень ориентирован на предоставление службам управления идентификацией возможности децентрализованного контроля над каталогами, аутентификацией пользователей, правами доступа, что и определяет политику безопасности с нулевым доверием.

Консолидированное управление политиками и состоянием. Данный уровень осуществляет миграцию политик безопасности из различных сред, с целью согласованного управления всеми частями системы. А именно, происходит преобразование правил и параметров конфигурации конкретной среды для динамической авторизации при использовании другой.

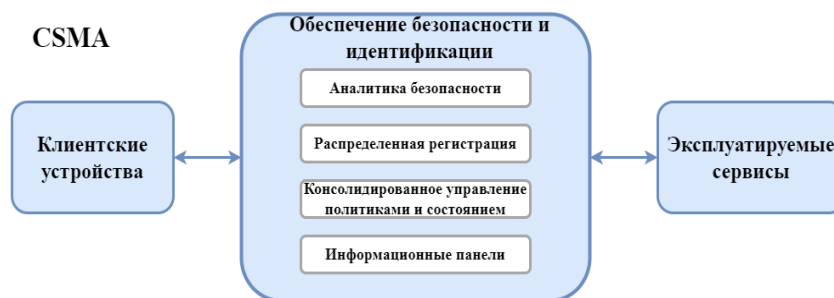


Рис.3. Уровни взаимодействия CSMA с инструментами защиты информации

Fig.3. Levels of interaction between CSMA and information security tools

Информационные панели. Этот уровень обеспечивает возможность контроля всей архитектуры безопасности, позволяя более эффективно обнаруживать, исследовать и реагировать на инциденты безопасности. Это достигается путем переключения между несколькими информационными панелями, либо за счет обобщения информации из различных источников в одной панели.

Вывод. Анализ рынка CSMA систем показал, что готовых решений, предоставляющих подобную функциональность нет. В перспективе возможность реализации данной технологии просматривается у Лаборатории Касперского. Результаты анализа показали, что мировое сообщество готово к противодействию современным векторам атак. Но в тоже время у конечного пользователя (администратора безопасности) остается множество вопросов, связанных с необходимостью использования подобных систем, в частности полноты функциональных компонентов, стоимости, поддержки и т.д. Естественным фактором выбора подобных систем будет является задачи, стоящие перед организацией, уровень обрабатываемой информации, количество пользователей и др. У каждого производителя существует свой набор функциональных компонентов, используются гибридные варианты, заимствуются элементы другого класса систем, что с одной стороны позволит предостеречь от большего количества атак, но с другой может быть избыточным. Это в очередной раз подтверждает важность оценки риска и глубокого понимания угроз безопасности к информационным системам определенного типа. Представленная работа раскрывает основные особенности функционирования средств защиты информации для инфраструктуры предприятия, что позволяет сделать выбор в пользу той или иной технологии исходя из потребностей.

Библиографический список:

1. ФСТЭК РФ. Руководящий документ. Автоматизированные системы. Защита от несанкционированного доступа к информации. Классификация автоматизированных систем и требования по защите информации [Эл. ресурс]. URL: <https://fstec.ru/tekhnicheskaya-zashchita-informatsii/dokumenty/114-spetsialnye-normativnye-dokumenty/384-rukovodyashchij-dokument-reshenie-predsedatelya-gostekhkommisii-rossii-ot-30-marta-1992-g> (дата обращения 20.06.2022).
2. ФСТЭК РФ. Руководящий документ. Концепция защиты средств вычислительной техники и автоматизированных систем от несанкционированного доступа к информации [Электронный ресурс]. — URL: <http://fstec.ru/component/attachment/s/299> (дата обращения: 26.06.2022).
3. Гостехкомиссия РФ. Руководящий документ. Средства вычислительной техники. Защита от несанкционированного доступа к информации. Показатели защищенности от несанкционированного доступа к информации. М.: Воениздат, 1992. – 29 с.
4. Котенко И.В., Саенко И.Б., Полубелова О.В., Чечулин А.А. Применение технологии управления информацией и событиями безопасности для защиты информации в критически важных инфраструктурах // Труды СПИИРАН. 2012. № 20 (1). С. 27-56.
5. Gustavo González-Granadillo, Susana González-Zarzosa and Rodrigo Diaz Security Information and Event Management (SIEM): Analysis, Trends, and Usage in Critical Infrastructures Sensors 2021, 21(14), 4759.
6. Федорченко А.В., Левшун Д.С., Чечулин А.А., Котенко И.В. Анализ методов корреляции событий безопасности в SIEM-системах. Часть 1. // Труды СПИИРАН. 2016. № 47 (4). С. 5-27.
7. Федорченко А.В., Левшун Д.С., Чечулин А.А., Котенко И.В. Анализ методов корреляции событий безопасности в SIEM-системах. Часть 2 // Труды СПИИРАН. 2016. № 49 (6). С. 208-225.
8. Котенко И.В., Ушаков И.А., Пелёвин Д.В., Преображенский А.И., Овраменко А.Ю. Выявление инсайдеров в корпоративной сети: подход на базе UBA и UEBA // Защита информации. Инсайд. 2019. № 5 (89). С. 26-35.
9. Федоров В.А., Щипцов Д.И. Обзор методов обнаружения инсайдеров в компьютерных сетях с применением UEBA-систем // European science forum. сборник статей IV Международной научно-практической конференции. Петрозаводск, 2020. С. 50-53.

10. Богданов В.В., Домуховский Н.А., Савин М.В. SOAR: автоматизация работы с инцидентами информационной безопасности // Защита информации. Инсайд. 2021. № 3 (99). С. 13-17.
11. Селезнёв В.М., Боровская О.Е. Встраивание инструментов SOAR-платформ в экосистему SOC для автоматизации процесса реагирования на инциденты ИБ // Международный научно-исследовательский журнал. 2022. № 10 (124).
12. Васильева И.Н. Современный подход к мониторингу безопасности сетевых информационных инфраструктур // Инновационные технологии и вопросы обеспечения безопасности реальной экономики. сборник научных трудов по итогам III Всероссийской научно-практической конференции. Санкт-Петербург, 2021. С. 24-32.
13. Безпалов М.Ю., Ланец С.А. Современные вызовы и технологические решения информационной безопасности // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. 2022. Т. 1. С. 181-186.
14. Савин М.В., Стойчин К.Л., Некрасов А.В., Комаров Н.В. Обзор стандартов и форматов представления автоматизированных сценариев реагирования на инциденты компьютерной безопасности // Защита информации. Инсайд. 2022. № 4 (106). С. 14-19.
15. Sneps-Snepp M., Namiot D. Rethinking the power of packet switching in the coming cyber threats era International Journal of Open Information Technologies. 2019. Т. 7. № 8. С. 48-58.

References:

1. FSTEC RF. Guidance document. Automated systems. Protection against unauthorized access to information. Classification of automated systems and requirements for information protection [El.res.]. URL: <https://fstec.ru/tekhnicheskaya-zashchita-informatsii/dokumenty/114-spetsialnye-normativnye-dokumenty/384-rukovodyashchij-dokument-reshenie-predsedatelya-gostekhkommisii-rossii-ot-30-marta-1992-g> (Date of circulation 06/20/2022). (In Russ)
2. FSTEC RF. Guidance document. The concept of protection of computer equipment and automated systems from unauthorized access to information [El. Res.]. URL: <http://fstec.ru/component/attachment/s/299> (date of access: 06/26/2022). (In Russ)
3. State Technical Commission of the Russian Federation. Guidance document. Computer facilities. Protection against unauthorized access to information. Indicators of security from unauthorized access to information. M.: Military Publishing House, 1992; 29. (In Russ)
4. Kotenko I.V., Saenko I.B., Polubelova O.V., Chechulin A.A. Application of Information and Security Events Management Technology for Information Protection in Critical Infrastructures. *Proceedings of SPIIRAS*. 2012; 20 (1): 27-56. (In Russ)
5. Gustavo González-Granadillo, Susana González-Zarzosa and Rodrigo Diaz Security Information and Event Management (SIEM): Analysis, Trends, and Usage in Critical Infrastructures Sensors 2021; 21(14): 4759.
6. Fedorchenko A.V., Levshun D.S., Chechulin A.A., Kotenko I.V. Analysis of security event correlation methods in SIEM systems. Part 1. *Proceedings of SPIIRAS*. 2016; 47 (4): 5-27. (In Russ)
7. Fedorchenko A.V., Levshun D.S., Chechulin A.A., Kotenko I.V. Analysis of security event correlation methods in SIEM systems. Part 2. *Proceedings of SPIIRAS*. 2016; 49 (6):208-225. (In Russ)
8. Kotenko I.V., Ushakov I.A., Pelevin D.V., Preobrazhensky A.I., Ovramenko A.Yu. Identification of insiders in a corporate network: an approach based on UBA and UEBA. *Information Security. Inside*. 2019; 5 (89): 26-35. (In Russ)
9. Fedorov V.A., Shchiptsov D.I. Overview of insider detection methods in computer networks using UEBA systems. European science forum. Collection of articles of the IV International scientific-practical conference. Petrozavodsk, 2020; 50-53. (In Russ)
10. Bogdanov V.V., Domukhovskiy N.A., Savin M.V. SOAR: automation of work with information security incidents. *Information security. Inside*. 2021; 3 (99): 13-17. (In Russ)
11. Seleznev V.M., Borovskaya O.E. Embedding SOAR platform tools in the SOC ecosystem to automate the process of responding to information security incidents. *International Research Journal*. 2022; 10 (124). (In Russ)
12. Vasilyeva I.N. A modern approach to monitoring the security of network information infrastructures. *Innovatsionnye tekhnologii i voprosy obespecheniya bezopasnosti real ekonomiki*. Collection of scientific papers based on the results of the III All-Russian scientific and practical conference. St. Petersburg, 2021; 24-32. (In Russ)
13. Bezpalov M.Yu., Lanets S.A. Modern challenges and technological solutions for information security. Scientific, technical and economic cooperation of the Asia-Pacific countries in the XXI century. 2022; 1: 181-186. (In Russ)
14. Savin M.V., Stoichin K.L., Nekrasov A.V., Komarov N.V. Overview of standards and formats for the presentation of automated scenarios for responding to computer security incidents. *Information Security. Inside*. 2022; 4 (106): 14-19. (In Russ)
15. Sneps-Snepp M., Namiot D. *Rethinking the power of packet switching in the coming cyber threats era International Journal of Open Information Technologies*. 2019;7(8): 48-58.

Сведения об авторах:

Попов Антон Дмитриевич, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры автоматизированных информационных систем органов внутренних дел; anton.holmes@mail.ru

Попова Арина Дмитриевна, слушатель; arnpva@mail.ru

Information about the authors:

Anton D. Popov, Cand. Sci. (Eng.), Senior Lecturer of the Department of Automated Information Systems of Internal Affairs Bodies; anton.holmes@mail.ru

Arina D. Popova, Student; arnpva@mail.ru

Конфликт интересов/ Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 04.11.2022.

Одобрена после рецензирования Revised 27.11.2022.

Принята в печать/ Accepted for publication 27.11.2022.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 004.056

DOI: 10.21822/2073-6185-2022-49-4-85-96

Обзорная статья / Review article

Защита от атак с применением средств и методов социальной инженерии

В.А. Репенко,¹ С.А.Резниченко^{1,2,3,4}

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,

¹115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31, Россия,

²Финансовый университет при Правительстве РФ,

²125993, г.Москва, Ленинградский пр-кт, 49, Россия,

³Российский государственный университет нефти и газа
(национальный исследовательский университет) им. И.М. Губкина,

³119991, г. Москва, Ленинский пр-кт, 65, корпус 1, Россия,

⁴Российский государственный гуманитарный университет,

⁴125047, г. Москва, Миусская площадь, д. 6, Россия

Резюме. Цель. В современном мире активно развиваются инновационные технологии, коммуникации переходят в интернет-пространство. Тем не менее новые технологии оказались востребованными и в сегменте организаций, физических лиц, кибер-мошенников и хакеров. Цель исследования заключается в анализе сущности и структуры современной социальной инженерии, в том числе, обратного социального инжиниринга в условиях цифровизации общества. **Метод.** Адаптируя исследование к текущему моменту, уточняется, что технологии, разработки и манипулятивные социологические тактики подхватываются не просто хакерами, но и последователями радикальных идей. **Результат.** Предложено оптимальное определение термина «социальная инженерия» – выявление и эксплуатация некомпетентности, недостаточного профессионального уровня или халатности сотрудников организации или частных лиц для получения несанкционированного доступа к конфиденциальным данным; совокупность технологий, базирующихся на использовании психологической специфики человека. **Вывод.** Новизна исследования состоит в углубленном исследовании классификации видов атак с использованием методов социальной инженерии и рекомендациях по противодействию и профилактике им.

Ключевые слова: социальная инженерия, обратная социальная инженерия, кибер-преступник, информационные системы, интернет, техники манипуляции, пользователи, программное обеспечение

Для цитирования: В.А. Репенко, С.А. Резниченко. Защита от атак с применением средств и методов социальной инженерии. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022; 49(4):85-96. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-4-85-96

Protection against attacks using social engineering tools and methods

V.A. Repenko¹, S.A. Reznichenko^{1,2,3,4}

¹ National Research Nuclear University "MEPhI", (Moscow Engineering Physics Institute),

¹31, Kashirskoe Highway, Moscow 115409, Russia,

² Financial University under the Government of the Russian Federation,

²49, Leningradsky Ave., Moscow 125993, Russia,

³ Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University),

³65, Leninsky Ave., building 1, Moscow 119991, Russia,

⁴ Russian State University for the Humanities,

⁴6, Miusskaya Square, Moscow 125047, Russia

Abstract. Objective. In the modern world, innovative technologies are actively developing,

communications are moving into the Internet space. Nevertheless, new technologies turned out to be in demand in the segment of organizations, individuals, cyber fraudsters and hackers. The purpose of the study is to analyze the essence and structure of modern social engineering, including reverse social engineering in the context of the digitalization of society. **Method.** Adapting the study to the current moment, it is clarified that technologies, developments and manipulative sociological tactics are picked up not just by hackers, but also by followers of radical ideas. **Result.** The optimal definition of the term "social engineering" is proposed - the identification and exploitation of incompetence, insufficient professional level or negligence of employees of an organization or individuals to obtain unauthorized access to confidential data; a set of technologies based on the use of the psychological specifics of a person. **Conclusion.** The novelty of the study lies in an in-depth study of the classification of types of attacks using social engineering methods and recommendations for countering and preventing them.

Keywords: social engineering, reverse social engineering, cyber criminal, sociology, digitalization, information systems, Internet, manipulation techniques, users, software

For citation: V.A. Repenko, S.A. Reznichenko. Protection against attacks using social engineering tools and methods. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science. 2022; 49 (4): 85-96. DOI: 10.21822 /2073-6185-2022-49-4-85-96

Введение. Сведения, которые обеспечивают их собственнику конкретную выгоду, помогают избежать чрезмерных затрат, а также обеспечить устойчивое рыночное положение, являются предметом повышенного интереса кибер-преступников и должны быть надежно защищены. По мнению экспертов, самым незащищенным и уязвимым сектором системы обработки данных является персонал компании и физические лица [1-4].

Для оказания нужного кибер-мошеннику воздействия на потенциальную жертву придется использовать все более изощренные способы и методы атак. В частности, для проведения несанкционированных действий по получению доступа к конфиденциальной информации особый упор ставится на специфику человеческого фактора.

Цель социальной инженерии заключается в обеспечении таких действий человека, которые бы он никогда не совершил в обычных условиях: разглашение данных конфиденциального характера; переходы на сомнительные сайты; добровольное согласие на скачивание и установление вредоносного программного обеспечения [5-16].

Социальный инжиниринг является достаточно молодой наукой. Автором первого научного обоснования выступил австрийский ученый К. Поппер в собственных исследованиях «Открытое общество» и «Нищета историцизма». В частности, в трактовке К. Поппера, социальная инженерия представляет собой «совокупность походов прикладной социологии, направленных на рациональное изменение социальных систем на основе фундаментальных знаний об обществе и предсказании возможных результатов преобразований» [17].

Отметим, что в той или иной форме человечество на протяжении тысячелетий использовало методы социального инжиниринга. Еще во времена Древнего Рима и Древней Греции был большой спрос на тех, кто мог ввести в заблуждение вторую сторону и обманом добиться ложной убежденности собеседника и нужных результатов. В частности, прямое использование таких людей много раз предотвращало вооруженные конфликты и находило дипломатический выход из крайне сложных положений.

Однако настоящий рассвет науки социальной инженерии пришелся на 50-60-е гг. XX в. в США и Великобритании. Например, приемы социнжиниринга широко задействовали спецслужбы перечисленных государств, которые и обеспечили социальной инженерии как научному направлению социологии глобальный практический характер. В данном случае, целью американских и британских спецслужб выступало создание и апробация технологий манипулирования человеческим сознанием [10].

70-е годы XX в. отметились стремительным развитием фрикинга – технологии, пред-

ставляющей собой набор методов и приемов по взлому уличных телефонных аппаратов, после чего методы социальной инженерии позволяли осуществлять управление телефонными сетями. К концу десятилетия фрикинг-мошенники стали настолько изощренными при использовании техник манипулирования операторами телефонных линий, что могли получить любые сведения.

Наиболее квалифицированные специалисты в области социальной инженерии всегда предпочитали работать экспромтом, основываясь на собственной интуиции, пользуясь практикой наводящих вопросов. Применяя определенные интонации голоса, такие люди могли выявить все страхи и комплексы конкретного лица и моментально выработать правильную стратегию их эксплуатации для достижения личного результата. Другими словами, использовался строго индивидуализированный подход.

Постановка задачи. В области информационных технологий социальный инжиниринг возник в качестве практической области обнаружения уязвимостей. Именно после того, как эксперты информационной безопасности стали едины во мнении, что максимальные риски информационных систем и технологий относятся к человеческому фактору, было принято решение использовать психологию влияния, манипулятивные технологии и тактику социальной инженерии.

Цифровизация же общества и перенос коммуникативных связей в интернет обусловил переход в цифровую сферу и практической социальной среды.

Цель исследования заключается в анализе сущности и структуры современной социальной инженерии, в том числе, обратного социального инжиниринга в условиях цифровизации общества.

Методы исследования. ИТ-системы пребывают в динамичном состоянии, оборудование и программные продукты непрерывно совершенствуются и усложняются. Для того, чтобы владеть ситуацией не только в рамках атаки, но и при защите, принципиально важно отслеживать новые тренды отрасли и просто быть в теме ИТ-бекграунда в принципе. Это и есть дорога развития классического хакера, который сегодня максимально романтизирован.

В настоящее время в хакерской группе присутствуют несколько узких специалистов, досконально владеющими конкретными технологиями конечной цели. Тем не менее, практически всегда главная задача состоит во взломе периметра защиты.

Рис. 1 демонстрируют объекты хакерских атак в 2021 г.

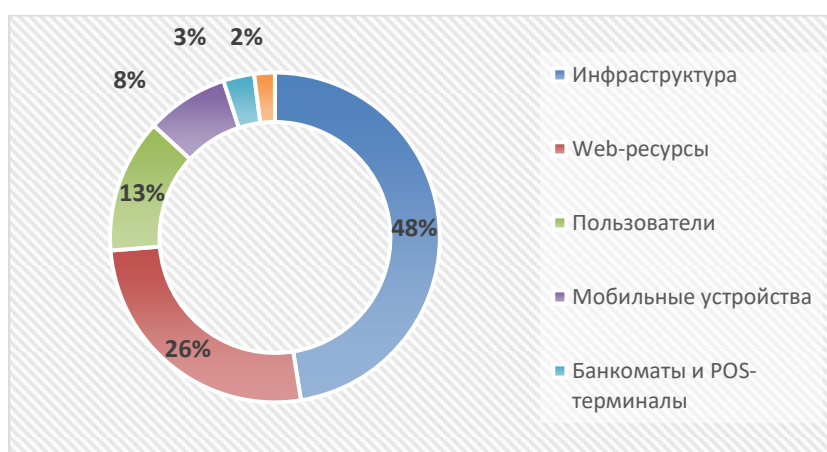


Рис. 1. Объекты хакерских атак в 2021 г. [7]

Fig. 1. Objects of hacker attacks in 2021

Рис. 2, в свою очередь, конкретизирует методы атак и место социальной инженерии в общей структуре киберпреступлений. Именно это и обуславливает актуальность социнжиниринга, который обязательно будет востребован.

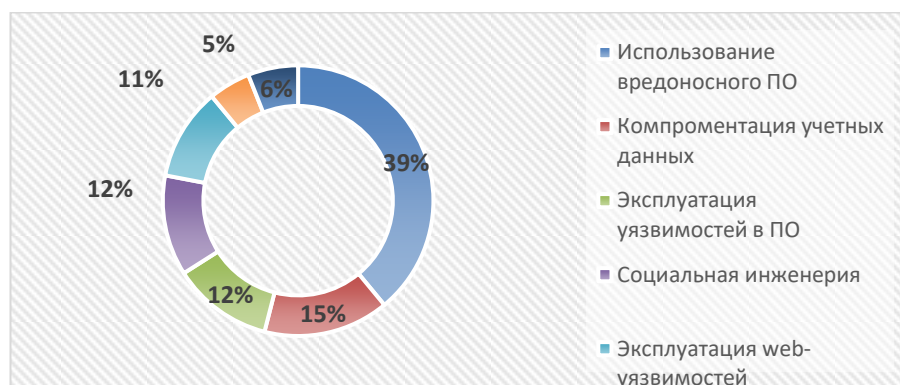


Рис.2. Методы хакерских атак в 2021 г. [7]

Fig. 2. Methods of hacker attacks in 2021

На первой стадии осуществляется сбор данных и подготовка, а уже на втором этапе сверху накладываются технологии и углубленное знание ИТ-систем.

Считается, что в отделе кибербезопасности компании все сотрудники делятся на две группы:

- 1) параноиков, которые в полной мере осознают, каким количеством ценной информации владеет персонал;
- 2) циников, у которых совершенно нет веры в благоразумие и осторожность остальных сотрудников.

Именно специалисты отдела кибербезопасности занимаются разграничением прав пользователей, разрабатывают инструкции и регламенты, а также осуществляют обработку критических ситуаций в реальности.

Все перечисленное дает возможность сформировать у сотрудников компании определенному иммунитету к интернет-мошенническим проявлениям, тем не менее, не гарантирует высокого уровня защиты. Главным недостатком выступает тот факт, что социнжиниринг не позволяет «поставить патч» и больше не контролировать процессы – однажды доказавшая свою эффективность киберпреступникам механика будет эффективна и вероятна всегда, поскольку поведение индивидов, в принципе, не претерпевает радикальных изменений.

Обсуждение результатов. Данные Центрального банка России свидетельствуют, что социальная инженерия является основным способом хищений со счетов в учреждениях банков и темп роста таких преступлений в данной сфере только возрастает (рис. 3).

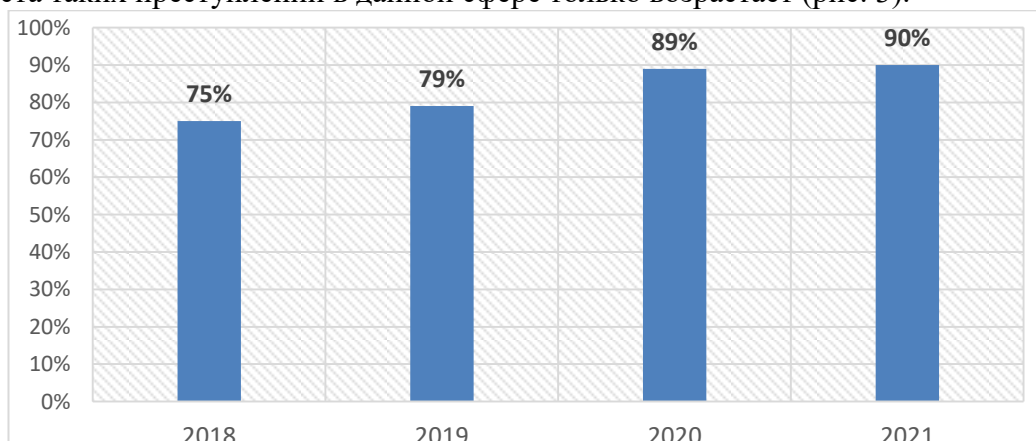


Рис. 3. Динамика количества хищений с банковских счетов, осуществленных методами социальной инженерии в 2019-2021 гг. [16]

Fig. 3. Dynamics of the number of thefts from bank accounts carried out by social engineering methods in 2019-2021

Также Центральный Банк России считает, что в ближайшем будущем острая ситуация вряд ли поменяется кардинальным образом и кибер-мошенники продолжают эксплуатировать феномен кибернеграмотности граждан России.

Поэтому регулятор предлагает криминализировать в Уголовном кодексе Российской Федерации нормы, предусматривающие уголовную ответственность за социальную инженерию и фишинг. В свою очередь, Министерство внутренних дел РФ категорически против того, чтобы вводить в УК РФ дополнительное количество статей. Аргументом служит тот факт, что действующие нормы уже предусматривают ответственность за следующие деяния [1]:

- 1) «ст. 159.6 УК РФ «Мошенничество в сфере компьютерной информации»;
- 2) ст. 159.3 УК РФ «Мошенничество с использованием электронных средств платежа»;
- 3) ст. 158 «Мошенничество».

Существует значительное количество разновидностей атак с использованием социальной инженерии, по состоянию на сентябрь 2022 г. классифицируют не менее 10 разновидностей. Если принимать во внимание и комбинированные способы, то общее количество видов атак достигает нескольких десятков. Именно поэтому принципиально важно не просто знать о ее существовании, но и детально разобраться в том, как она работает. Именно получив навык идентифицировать главный механизм действия, появляется возможность повысить эффективность распознавания атак такого типа:

1. Фишинг. Термин происходит от английского слова «fishing» – рыбалка, выуживание. Данный тип атаки представляет собой интернет-мошенничество, осуществляемое ради того, чтобы заполучить доступ к конфиденциальной информации пользователей. Как правило, первоочередной интерес представляют собой сетевые учетные данные, данные банковских карт, логины и пароли, которые добываются у доверчивых пользователей с помощью предложных сайтов и web-страниц.

Акцентируем внимание на том, что иногда кибер-преступнику достаточно данных или других личных сведений о пользователе-жертве. Но иногда фишинговые письма своей целью имеют получение регистрационных данных конкретного работника или прочих сведений, которые будут использованы при расширенной атаке на определенную компанию.

В том числе фишинговая атака может проводиться так, что после перенаправления пользователя на ложный сайт появится еще ряд проблем:

- а) на ПК будет автоматически установлено вредоносное программное обеспечение;
- б) система откажется функционировать из-за атаки софта-вымогателя.

2. Ловля на «живца». В рамках данного типа атак злоумышленник, ловец, оставляет приманку, которая может представлять собой флешку, зараженную вирусом. Обнаруживший ее пользователь, движимый чувством любопытства, наверняка вставит флешку в свой ПК, после чего вирус уничтожает систему. Утоним, что есть флешки, которые могут повредить ПК – зарядка такого ИТ-аксессуара производится USB-порт, после чего происходит высвобождение сверхмощного заряда посредством устройства ввода. По состоянию на начало 2022 г. стоимость такой флешки в Даркнете составляла всего 54 доллара [14].

3. Кви про кво. Термин происходит от латинского «Quid pro quo», что в переводе означает «то за это». В соответствии с данным методом проведения кибератаки преступник звонит в компанию по корпоративному телефону. Как правило, он называет себя специалистов технической поддержки компании, который интересуется наличием проблем, которые должны быть срочно исправлены. Под легендой решения озвученных пользователем проблем преступник мотивирует сотрудника ввести конкретный набор команд, предоставляющих в будущем удаленный доступ к его рабочему месту.

4. Троян или вирус «Троянский конь». Представляет собой вредоносный код, который проникает в ПК сотрудника, полагающего, что идет установка или обновление программных продуктов.

5. Претекстинг. Метод заключается в применении интернет-мошенником предлога, который заставляет жертву предоставить конфиденциальные данные. В частности, банальный интернет-опрос может привести к выведыванию финансовых или банковских данных.

Важность более детального исследования фишинга подтверждается статистикой отчета о

киберпреступности, проведенного США, в котором указывается, что именно фишинговые атаки стали причиной потери частными лицами и организациями не менее 58 млн. долл. Общая численность жертв фишинга составила 115 тысяч [15]. Подчеркнем, что эти данные касаются только США, глобальная статистика же многократно выше.

Известны следующие виды фишинговых кибератак:

- **целевой или Spear Phishing** – с первого взгляда может напоминать стандартный фишинг, однако целью выступает конкретный человек или компания. Поэтому на первоначальном этапе злоумышленники осуществляют сбор детальной информации о том, кто является целью, после чего идет рассылка электронных писем, правдоподобно адаптированных под интересы конкретизированной жертвы. Эксперты, как правило, называют данную разновидность фишинга самой продвинутой, поскольку при его реализации следует серьезная проработка цели. Именно поэтому так сложно выстроить эффективную защиту против целевой фишинговой атаки. Уточним, что обычно лицо, которое выбрано объектом такой атаки – не конечная реальная цель кибер-мошенников. Обычно реальной целью является корпоративная сетевая инфраструктура, контроль над которой даст возможность осуществить промышленный шпионаж или получить финансовую выгоду;
- **голосовой или Voice Phishing** – предполагает использование телефонной связи для доступа к личным данным или финансовой информации о пользователе-жертве. Механика реализации такого вида фишинга следующая – преступник под видом работника страховой фирмы или банковского учреждения, рекламируя очень выгодную услугу, выуживает из жертвы необходимые личные сведения. В частности, среди «вишеров» считается эффективным уловка с предложением кредита на максимально выгодных для жертвы условиях. Однако в рамках обсуждения условий кредита всегда требуются личные данные пользователя и сведения финансового характера. Поэтому жертва совершенно искренне предоставляет кибер-мошеннику конфиденциальные данные. Наиболее аморальным видом голосового фишинга выступает «работа» с больными или пожилыми людьми. Преступник совершенно цинично и бесчеловечно использует уязвимое психическое или физическое состояние жертвы, чтобы получить доступ к его личным данным. Наживкой в данном случае выступают посулы оказания финансовой помощи сразу после предоставления персональных данных. Также часто встречается разновидность фишинговых атак, в ходе которых жертву информируют об ужасном происшествии, которое произошло с родственниками или близкими. Причем дается обещание решить проблему после оперативного перевода денежных средств;
- **«китобойный» или Whake Phishing** – представляет собой атаку, целью которой является топ-менеджер большой компании, что и предполагает собой такое название. Жертва такой атаки, как и потенциальная выгода, крайне велики, полученная конфиденциальная информация будет такого уровня, который недоступен, в случае если жертвой выступает рядовой сотрудник компании. Именно поэтому и фишинговый текст должен быть соответствующего уровня: юридические сообщения или предложения финансового характера. Самой значительной успешно реализованной «китобойной» атакой является совершенная хакерской группой Эвалдаса Римаскаускаса (Литва) атака на Facebook и Google. В рамках коммуникации с указанными гигантами хакерами была создана фальшивая компания, которая представлялась производителями ПК и уже имела опыт сотрудничества. Общие убытки от «китобойной» фишинговой атаки составили свыше 120 млн. долл. США [19];
- **СМС-фишинг или Smishing** – подразумевает использование мобильных гаджетов. Цель получает сообщение якобы с номера банка, содержание которого должно напугать человека, после чего ему предлагается вариант решения проблемы. Приведем пример такого вида фишингового мошенничества: с лицевого счета человека якобы были списаны средства нецелевым способом, поэтому клиенту банка предлагается перейти по ссылке

на официальную (на самом деле, поддельную) страницу банка или перезвонить по конкретному номеру телефона, контроль за которым осуществляется также злоумышленниками. Если жертва попадает в руки изощренных преступников, ее могут обманывать продолжительное время, на протяжении целых месяцев, снимая небольшие суммы, чтобы не насторожить жертву;

- **клон-фишинг** (от англ. Clone Phishing) состоит в том, что кибер-преступник готовит и направляет ложное электронное письмо, которое внешне сложно отличить от стандартного письма, отправляемого надежными и широко известными источниками. В частности, может быть указано, что отправитель Mail.scorp вместо Mail.com, как пишется в оригинале. Другими словами, электронное фишинговое письмо очень похоже на то, которое может прийти от банковского учреждения или вашей телекоммуникационной компании. В таком письме жертве поступает просьба от сотрудников соответствующего учреждения предоставить сведения личного характера. В рамках данного типа фишинговой атаки кибер-преступники подделывают форму корпоративного электронного письма, получая в результате очень похожий образец. Однако отправка данного письма осуществляется не с реального, а похожего адреса. Ссылки в теле письма являются опасными и вредоносными. Также текст содержит убедительное пояснение того, почему пришло данное сообщение и по какой причине запрашиваются личные данные. Одним из наиболее показательных примеров клон-фишинга является глобальная атака, имевшая место в январе 2022 г., в ходе которой кибер-преступники очень убедительно представили сообщения от Министерства труда Соединенных Штатов (DoL), в результате чего был получен доступ к учетным данным с сервиса Office 365 [23];
- **кража с диверсией**, второе название Diversion Theft, представляет собой еще один способ мошенничества «социальных инженеров», в рамках которого ничего не подозревающие курьерские службы доставляют заказчикам фейковые товары. При этом дорогостоящие оригиналы становятся добычей самих кибер-преступников. Механика преступления такова: в компанию по оказанию услуг курьерской доставки внедряется сообщник, вследствие чего у мошенников появляется непосредственный доступ к перечню товаров для доставки. В результате они будут срочно заменяться на копии. Время появления данного метода мошенничества относится еще к временам до внедрения интернета, родиной является Лондон, район Ист-Энд. Тем не менее, именно Всемирная Паутина дала толчок стремительному развитию кражи с диверсией, поскольку манипуляция сведениями максимально упрощена;
- **мошенническая атака**, также называется Rogue Attack, фактически является одним из видов Scareware-атак. ПК будущей жертвы оснащается шпионским программным обеспечением, мотивируя это сообщениями безопасности. При этом владелец компьютера убежден, что устанавливаемый софт полностью безопасен и находится в правовом поле. Вредоносное ПО после его активации формирует оповещения и всплывающие окна, рекомендуя установить дополнительный «полностью безопасный и законный» софт. Как правило, во всплывающих окнах пользователь получает разные варианты сценария соглашений. Тем не менее, при нажатии на «да» любого из предлагаемых вариантов жертва устанавливает на своем ПК вредоносную программу, отдавая свою компьютер в полное распоряжение кибер-преступника;
- **«водопой»** или Water-Holing. Сущность атаки данного типа полностью отражается в самом термине «водопоя». С помощью существующих уязвимостей сети кибер-преступник осуществляет компрометирующие действия в отношении группы лиц. Для этого происходит заражение сайтов, на которые они ходят и которым привыкли полностью доверять. Мошенники могут выбирать востребованные сайты, которые в их среде носят название «целевой группы». Благодаря встроенному в уязвимости сайта вредоносному ПО в виде HTML-кодов или Java Script происходит массовое перенаправление «це-

левой добычи» на другой сайт, который и внедряет вредоносное ПО. Как правило, целевой добычей выступает персонал государственных учреждений или крупных компаний;

- **оригинальнейшие методики «катания на спине» или «задняя дверь»** (Tailgating или Piggy back) представляет собой метод получения доступа в закрытое или охраняемое помещение, просто следуя за кем-то, у кого есть карта доступа. При этом кибер-преступник позиционирует себя как «друг» человека, обладающего привилегированным доступом, что делает для него возможным доступ в зону ограниченного доступа;
- **«медовая ловушка»**, еще называемая Honey Trap, Honey Pot, действует по принципу, описанному в басне про ворону и лисицу. Принцип действия таков – кибер-преступник знакомится с будущей жертвой и очень достоверно имитирует формирования влечения или романтического чувства. Довольно быстро развиваются виртуальные личные отношения, в искренности которых жертва не сомневается. В это время кибер-мошенник, обладающий серьезным обаянием, осуществляет усиленный сбор личных данных, которые впоследствии используются для взлома аккаунтов в социальных сетях или электронной почты жертвы. В случае необходимости жертва может передать и удаленный доступ к своему ПК;
- **методика «услуги за услугу»** или второе название Quid pro quo, как правило, используется кибер-преступниками, которые не располагают инновационными инструментами взлома, тем не менее, осуществляют предварительную разведку будущей цели. В частности, в рамках данного вида атак преступник создает иллюзию, что жертве была оказана очень серьезная услуга. Например, кибер-мошенник выбирает жертву из числа лиц с привилегированным доступом, совершает ей звонок от лица представителя технической поддержки. После проведения конструктивного диалога жертва соглашается принять «помощь» от преступника в ликвидации якобы выявленных проблем и уязвимостей. Для этого жертва выполняет все рекомендуемые мошенником последовательности действий. В результате на компьютер жертвы устанавливается вредоносное программное обеспечение или же утекают регистрационные данные;
- **атака с предлогом**, также носящая название Pretexting attack, представляет собой ложь со стороны кибер-мошенника, который таким образом, пытается заполучить доступ к информации высокого уровня. Инициатором такого типа мошенничеств зачастую выступает недобросовестный работник компании-жертвы, который имитирует срочную необходимость получить данные конфиденциального характера, что позволит ему решить срочную и важную задачу. В данном случае, прямой взлом отсутствует, имеет место сугубо психологическое воздействие, которое со стороны выглядит очень естественным и не вызывает, на первый взгляд, никаких опасений и подозрений;
- **атака по методу «пугалка»** или Scareware заключается в угрозах и испуге потенциальной жертвы в том, что ПК уже заражено шпионским программным обеспечением или жертва сама загрузила нелегальный контент. Как правило, такие угрозы поступают через всплывающие окна, после того как пользователь побывал на взломанных хакерами сайтах. После того, как предполагаемая жертва, скажем так, достигла определенной стадии отчаяния, кибер-преступник сам предлагает решение проблемы – вредоносное ПО, позиционируемое как эффективный антивирус.

Целью данной акции является получение несанкционированного доступа к личным данным выбранной жертвы. Анализируя механику атаки «пугалки», можно выделить главный прием – технология внушения, которая формирует страх у пользователя и мотивирует его согласиться на установку ложного антивирусного ПО [13].

Метод обратной социальной инженерии ориентирован на то, чтобы смодулировалась ситуация, когда потенциальная жертва принимает навязанное решение обратиться к инициатору за решением созданной им проблемы [8,18].

В частности, практическим примером данной механики выступают атаки с использова-

нием вируса-шифровальщика. При угрозах такого типа дешифровка собственными силами нереализуема. Поэтому вирусы-шифровальщики используют оболочку полезного программного обеспечения или ожидаемые файлы. Файлы могут маскироваться под стандартные для конкретного пользователя «договор», «судебное постановление», «заказ №» и т.д.

Сегодня обратная социальная инженерия использует методику информационного манипулирования тем, что та или иная проблема не имеет легального решения, происходит грамотная дискредитация общественных ценностей и явлений, в результате чего индивида или целевую группу людей подталкивают на вступление в радикальные группы, участие в антигосударственных несанкционированных мероприятиях.

Применение обратной социальной инженерии в качестве полноценного метода профилактики практически невозможно, потому что он предполагает деструктивные манипуляции и давление.

Эксперты считают, что самое главное в защите персонала и организации в целом – это постоянное информирование пользователей всех подразделений на каждом уровне управленческой иерархии об угрозах социальной инженерии, существующих и новых видах атак, о психологических технологиях, которые применяют хакеры при поиске доступа к конфиденциальной информации. Тем не менее, принципиально важна и профилактика:

1) постоянное тестирование на проникновение. Сотрудники IT-подразделений должны осуществлять постоянное тестирование на возможные атаки, в основе которых лежат технологии именно социальной инженерии. Благодаря этому у администраторов появится возможность классификации рисков для конкретных видов атак. Также периодическое тестирование позволяет выявить готовность персонала к противодействию кибер-мошенникам и спрогнозировать масштаб потенциальной утечки информации. Фишинговое тестирование, как правило, проводится с помощью специальных программ. Сущность такого тестирования состоит в рассылке персоналу фишинговых электронных писем и установление пользователей, которые поверили методам социальной инженерии. В дальнейшем эти работники направляются на переподготовку;

2) двухфакторная аутентификация, которая, в свою очередь, предполагает введение двух методов подтверждения личности: пароль при входе; код, отправляемый на номер телефон;

3) применение эффективной защиты от вредоносного софта. В рамках такой защиты важен принцип комплексности, предполагающий одновременное использование следующих тактических средств: почтового антивируса; противощпионского программного обеспечения (antimalware); антивирусное программное обеспечение для обеспечения возможности безопасного веб-серфинга [21].

Отметим, что некоторые компании предлагают подобную защиту в пакетной версии, однако доказали свою эффективность и одновременное применение сразу нескольких хороших программ от разных разработчиков.

Едва ли не ключевой задачей в рамках данного профилактического мероприятия считается предотвращение угроз при переходе пользователя по ссылкам из мессенджеров и писем. В данном случае, должна быть предотвращена загрузка страницы с вредоносным контентом путем ее блокировки.

4) обязательные своевременные обновления операционной системы, поскольку компании-разработчики постоянно выпускают фиксы, которые устраняют выявленные уязвимости предыдущих версий;

5) грамотные пароли и их периодическая смены. Принципиально важной, считаем, является строгая политика управления паролями, которая выступает правильной профилактической мерой. Однако мало время от времени пользователю просто менять пароль, следует научиться составлять сложные, случайно сгенерированные их версии, которые не поддаются ни подбору, ни угадыванию. Все это требует проведения мероприятий по повышению квалификации персонала в соответствующей области;

6) обязательное использование брандмауэра, например, сетевого фаервола (WAF), кото-

рый блокирует любые шпионские запросы, включая и атаки с применением методов социальной инженерии. Следовательно, любой проход на интересующих пользователя сайт возможен только после того, как запрос отфильтрован WAF. Именно фаервол определяет безопасность подключения;

7) обеспечение положительного психологического климата в коллективе [11]. В данном случае персонал должен не стесняться информировать коллектив и IT-подразделение о появившихся подозрениях, в случае если они считают, что на них направлена атака с использованием тактики социальной инженерии. В случае, если соответствующая атмосфера доверия в коллективе отсутствует, сотрудник не поделится подозрениями, поскольку будет опасаться насмешек или ожидать возможное наказание.

Главным механизмом кибер-мошенников для хищения денежных средств у россиян является применение методов и инструментов социальной инженерии. В рамках использования данного метода человек самостоятельно передает кибер-преступникам огромные суммы или предоставляет личные сведения коммерческого и строго конфиденциального характера, что дает возможность похитить активы человека. В соответствии со статистикой ПАО «Сбербанк» 94% от преступлений, совершенных с помощью социальной инженерии, приходится на телефонное мошенничество.

Правоохранительные органы России и специалисты по кибербезопасности давно утверждают, что подавляющее большинство мошеннических звонков россиянам производится с территории Украины. Начиная с 2016 г., фактической «столицей» данного вида «бизнеса» является город Днепропетровск. Только в этом крупном городе функционировало не менее 150 криминальных колл-центров. Это огромный сектор теневого бизнеса, который взаимодействовал не только с международной преступностью, но и напрямую был связан с украинскими спецслужбами.

Информация о будущей жертве, как правило, приобретается в Даркнете, причем стоимость баз, например, сотовых операторов крайне демократична – порядка 20 тыс. руб. Поэтому мошенников не затрудняет приобрести сразу несколько таких баз, дополнить их сведениями из соцсетей и базами сервиса логистических компаний (например, сервиса по доставке готовой еды).

В настоящее время с территории Украины поступают звонки следующего содержания:

- 1) радикальные призывы совершать акты гражданского неповиновения и участвовать в несанкционированных митингах;
- 2) звонки из военкомата по поводу мобилизации;
- 3) звонки из учреждений российских банков о совершении несанкционированных операций со счетами клиента.

Также следует отметить, что кибер-мошенники из Украины переместились в соцсети, где их потенциальными жертвами является молодежь 18-22 лет. Данные МВД РФ свидетельствуют о том, что в период с 2018 по октябрь 2022 г. граждане России были обмануты на сумму свыше 200 млрд. руб. Это не просто сухая статистика, за этим огромными цифрами стоят трагедии конкретных людей [5].

Вывод. В современных условиях геополитической напряженности и усиления киберпреступлений во всех областях применение технологий социальной инженерии оперативно подстраивается под текущую ситуацию и приобретает эффективность особенно в отношении тех пользователей, который недоинформированы о рисках и угрозы цифровой среды. В статье предлагается оптимальное определение термина «социальная инженерия» – это выявление и эксплуатация некомпетентности, недостаточного профессионального уровня или халатности сотрудников организации или частных лиц для получения несанкционированного доступа к конфиденциальным данным. Другими словами, это совокупность технологий, базирующихся на использовании психологической специфики человека.

В целом, вся система социальной инженерии базируется на том, что именно индивид

представляет собой самое уязвимое звено любой информационной системы, что активно используется кибер-преступниками. Современный социальный инжиниринг дает возможность корректировать социальную реальность, используя методы прогнозирования, планирования и программирования.

Библиографический список:

1. Уголовный кодекс Российской Федерации от 13.06.1996 N 63-ФЗ (ред. от 24.09.2022) // Электронно-правовая база «КонсультантПлюс». – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_10699/ (дата обращения 18.10.2020).
2. Кэрролл Э. Изард. Психология эмоций / Изард Э. Кэрролл. – СПб.: Питер. 1999. 357 с.
3. Ламинина О.Г. Возможности социальной инженерии в информационных технологиях / О.Г. Ламинина // Гуманитарные и общественные науки. – 2019. – №2. – С. 8-14.
4. Созаев С.С., Кунашев Д.А. Социальная инженерия, ее техники и методы ее противодействия / С.С. Созаев, Д.А. Кунашев // Вестник науки. – 2020. – Т.1. – №2(23). – С. 85-88.
5. Станислав Кузнецов: против России ведется необъявленная кибервойна / С. Кузнецов // РИА Новости. – 08.10.2022. – URL: <https://ria.ru/20220418/kuznetsov-1784035779.html> (дата обращения 16.10.2022).
6. Стеценко Ю.А., Холодковская Н.С. Мошенничество в сети Интернет / Ю.А. Стеценко, Н.С. Холодковская // Вестник Таганрогского института имени А.П. Чехова. – 2021. – №4. – С. 75-80.
7. Суворова В.В., Суворова Л.А. Совершение преступлений с использованием социальной инженерии: постановка проблемы. Теория и практика приоритетных научных исследований: сборник научных трудов по материалам VIII Международной научно-практической конференции. Изд. МНИЦ «Наукоосфера», 2019. С. 71-74.
8. Тепляков С.П., Тимохович А.С. Социальная инженерия. Анализ и методы защиты / С.П. Тепляков, А.С. Тимохович // Academy. – 2018. – №11. – С. 26-27.
9. Титкова Е.В. Способы инициации атак с применением методов инженерии / Е.В. Титкова // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2020. – Т. 2. – С. 248-250.
10. Чеботарева С.С. Использование социоинженерного подхода в распространении и профилактике радикальных идей / С.С. Чеботарева // Обзор. НЦПТИ. – 2020. – №2 (21). – С. 57-66.
11. Чалдини Роберт Б. Психология влияния / Б. Роберт Чалдини. – СПб.: Изд-во «Питер», 2016. – 389 с.
12. Янгаева М.О. Социальная инженерия как способ совершения киберпреступлений / М.О. Янгаева // Вестник Сибирского юридического института МВД России. – 2021. – №1 (42). – С. 133-138.
13. Hadnagy Ch., Wilson P. Social Engineering: The Art of Human Hacking. Indianapolis: Wiley Publishing, Inc., 2020. 416 p.
14. Как избежать атаки с использованием социальной инженерии / Официальный сайт Лаборатории Kaspersky. – URL: <https://www.kaspersky.ru/resource-center/threats/how-to-avoid-social-engineering-attacks> (дата обращения 10.10.2022).
15. Отчет о киберпреступности «Internet Crime Report 2019» // Federal Bureau of Investigation. – URL: https://www.ic3.gov/Media/PDF/AnnualReport/2019_IC3Report.pdf (дата обращения 14.10.2022).
16. Официальный сайт ежедневной деловой газеты РБК. – URL: https://www.rbc.ru/technology_and_media/17/04/2020/5e988cc29a7947ff6c7b4e6e ПРО СБЕРБАНК (дата обращения: 18.10.2022).
17. Поппер К.Р. Открытое общество и его враги / К.Р. Поппер. – М.: Проспект, 1992. URL: <https://gtmarket.ru/laboratory/basis/3912/3913> (дата обращения: 20.09.2022).
18. Социальная инженерия — как не стать жертвой. – URL: <https://efsol.ru/articles/social-engineering.html> (дата обращения: 06.05.2020).
19. Lithuanian Man Sentenced To 5 Years In Prison For Theft Of Over \$120 Million In Fraudulent Business Email Compromise Scheme // The United States Department of Justice. – URL: <https://www.justice.gov/usao-sdny/pr/lithuanian-man-sentenced-5-years-prison-theft-over-120-million-fraudulent-business> (дата обращения 09.10.2022).
20. Business Mobile Banking Rank. Markswobb. – URL: <https://markswobb.ru/upload/iblock/255/2559c9b9ebc370b64a380c0af5135062.pdf> (дата обращения 18.10.2022).
21. Kromholz K., Hobel H., Weippl E. Advanced Social Engineering Attacks // Journal of Information Security and Applications. 2015. Vol. 22. P. 113–122. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.jisa.2014.09.005> (дата обращения 20.10.2022).
22. Safa N.S., von Solms R., Fitcher L. Human Aspects of Information Security in Organizations // Computer Fraud & Security. 2016. Vol. 2016. Iss. 2. P. 15–18. URL: [https://doi.org/10.1016/S1361-3723\(16\)30017-3](https://doi.org/10.1016/S1361-3723(16)30017-3) (дата обращения 18.10.2022).
23. Разнообразный арсенал социальной инженерии: виды атак и способы их предотвращения / Эксперт 1shaman // ХАБР. Блог компании FirstVDS Информационная безопасность. – URL: <https://habr.com/ru/company/first/blog/670766/> (дата обращения 10.10.2022).

References:

1. Criminal Code of the Russian Federation dated 13.06.1996 n c 63-FZ (ed. dated 24.09.2022) // Electronic legal base "ConsultantPlus". – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_10699/ (accessed 18.10.2020).
2. Carroll E. Izard. Psychology of emotions. St. Petersburg: Peter. 1999; 357.
3. Laminina O.G. Possibilities of social engineering in information technologies. *Humanities and social sciences*. 2019; 2: 8-14.
4. Sozaev S.S., Kunashev D.A. Social engineering, its techniques and methods of its counteraction. *Bulletin of Science*. 2020; 1(2(23)): 85-88.
5. Stanislav Kuznetsov: an undeclared cyber war is being waged against Russia. S. Kuznetsov. RIA Novosti. 08.10.2022. – URL: <https://ria.ru/20220418/kuznetsov-1784035779.html> (accessed 16.10.2022).
6. Stetsenko Yu.A., Kholodkovskaya N.S. Fraud on the Internet / Yu.A. Stetsenko, N.S. Kholodkovskaya. *Bulletin of the Taganrog Institute named after A.P. Chekhov*. 2021; 4: 75-80.
7. V.V. Suvorova, L.A. Suvorova. Committing crimes using social engineering: problem statement. Theory and practice of priority scientific research: a collection of scientific papers based on materials from the VIII International Scientific and Practical Conference. Izd. MNITS "Naukosphere", 2019; 71-74.

8. Teplyakov S.P., Timokhov A.S. Social engineering. Analysis and methods of protection. *Academy*. 2018; 11: 26-27.
9. Titkova E.V. Methods of initiating attacks with the use of engineering methods. *Actual problems of aviation and cosmonautics*. 2020; 2: 248-250.
10. Chebotareva S.S. The use of a socio-engineering approach in the dissemination and prevention of radical ideas Review. *NCPTI*. 2020; (21): 57-66.
11. Cialdini Robert B. Psychology of influence. St. Petersburg: Publishing house "Peter", 2016; 389.
12. Yangaeva M.O. Social engineering as a way of committing cybercrimes / M.O. Yangaeva. *Bulletin of the Siberian Law Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia*. 2021; 1(42): 133-138.
13. Hadnagy Ch., Wilson P. Social engineering: the art of hacking people. Indianapolis: Wiley Publishing, Inc., 2020; 416.
14. How to avoid an attack using social engineering. Kaspersky Lab official website. – URL: <https://www.kaspersky.ru/resource-center/threats/how-to-avoid-social-engineering-attacks> (accessed 10.10.2022).
15. Report on cybercrime "Report on crimes on the Internet for 2019" // Federal Bureau of Investigation. – URL: https://www.ic3.gov/Media/PDF/AnnualReport/2019_IC3Report.pdf (accessed 14.10.2022).
16. The official website of the daily business newspaper RBC. – URL: https://www.rbc.ru/technology_and_media/17/04/2020/5e988cc29a7947ff6c7b4e6ePRO_SBERBANK (publication date: 10/18/2022).
17. Popper K.R. Open Society and its enemies / K.R. Popper. – Moscow: Prospect, 1992. URL: <https://gtmarket.ru/laboratory/basis/3912/3913> (accessed: 09/20/2022).
18. Social engineering — how not to become a victim. URL: <https://efsol.ru/articles/social-engineering.html> (date of appeal: 06.05.2020).
19. Lithuanian Sentenced To 5 Years In Prison For Stealing More Than \$ 120 Million In A Fraudulent Scheme Of Compromising Business Email. United States Department Of Justice. URL: <https://www.justice.gov/usao-sdny/pr/lithuanian-man-sentenced-5-years-prison-theft-over-120-million-fraudulent-business> (accessed 09.10.2022).
20. Rating of mobile banking for business. Markswobb. URL: <https://markswobb.ru/upload/iblock/255/2559c9b9ebc370b64a380c0af5135062.pdf> (accessed 18.10.2022).
21. Krombholz K., Hobel H., Huber M., Weippl E. Advanced attacks of social engineering // Journal of Information Security and Applications. 2015;22:113-122. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jisa.2014.09.005> (accessed 20.10.2022).
22. Safa N.S., von Solms R., Fitcher L. Human aspects of information security in organizations. *Computer fraud and security*. 2016; 2: 15-18. URL: [https://doi.org/10.1016/S1361-3723\(16\)30017-3](https://doi.org/10.1016/S1361-3723(16)30017-3) (accessed 18.10.2022).
23. Diverse arsenal of social engineering: types of attacks and ways to prevent them / Expert 1shaman // HABR. Blog of the company FirstVDS Information security. – URL: <https://habr.com/ru/company/first/blog/670766/> (accessed 10.10.2022).

Сведения об авторах:

Репенко Виктор Андреевич, магистр; repenkovic@yandex.ru, ORCID.0000-0001-8783-6975

Резниченко Сергей Анатольевич, кандидат технических наук, доцент; rsa_5@bk.ru, ORCID.0000-0002-539-0457

Information about authors:

Viktor A. Repenko, master; repenkovic@yandex.ru, ORCID.0000-0001-8783-6975

Sergey A. Reznichenko, Cand.Sci. (Eng.), Assoc. Prof.; rsa_5@bk.ru, ORCID.0000-0002-539-0457

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 01.11.2022.

Одобрена после рецензирования/ Revised 26.11.2022.

Принята в печать/Accepted for publication 26.11.2022.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 004.056

DOI: 10.21822/2073-6185-2022-49-4-97-103

Обзорная статья / Review article

К вопросу анализа нормативно-правовых документов по информационной безопасности автоматизированных систем органов внутренних дел Российской Федерации для оценки уровня их защищенности

Е.А. Рогозин, И.Г. Дровникова, А.О. Ефимов, В.Р. Романова

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

Резюме. Цель. При решении научной задачи, связанной с оценкой защищенности автоматизированных систем органов внутренних дел, в частности, при разработке методики количественной оценки защищенных автоматизированных систем органов внутренних дел, первым этапом решения является анализ международных, российских, а также ведомственных нормативно-правовых документов по информационной безопасности (ИБ) автоматизированных систем органов внутренних дел Российской Федерации (АС ОВД РФ), по результатам анализа которых необходимо разработать методику количественной оценки уровня защищенности АС ОВД РФ. **Метод.** В ходе работы произведен анализ международных, российских, а также ведомственных нормативно-правовых документов по информационной безопасности АС ОВД РФ. **Результат.** Получен исчерпывающий список литературы, включающий в себя международные, российские, а также ведомственные нормативно-правовые документы по информационной безопасности АС ОВД РФ. **Вывод.** Анализ международных, российских, а также ведомственных нормативно-правовых документов по информационной безопасности АС ОВД РФ показал, что документы, посвященные защите информации АС ОВД РФ, а также методика количественной оценки уровня защищенности этих систем проработана в недостаточном объеме, в частности, отсутствуют система показателей, а также математические модели и алгоритмы оценки уровня защищенности АС ОВД РФ, что требует значительного совершенствования этих документов.

Ключевые слова: оценка уровня защищенности, автоматизированная система, защищенная автоматизированная система, количественная оценка, информационная безопасность

Для цитирования: Е.А. Рогозин, И.Г. Дровникова, А.О. Ефимов, В.Р. Романова. К вопросу анализа нормативно-правовых документов по информационной безопасности автоматизированных систем органов внутренних дел Российской Федерации для оценки уровня их защищенности. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022; 49(4):97-103. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-4-97-103

On the issue of analysis of legal documents on information security of automated systems of internal affairs bodies of the Russian Federation to assess the level of their security

E.A. Rogozin, I.G. Drovnikova, A.O. Efimov, V.R. Romanova

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

Abstract. Objective. When solving a scientific problem related to assessing the security of automated systems of internal affairs bodies, in particular, when developing a methodology for quantifying protected automated systems of internal affairs bodies, the first stage of the solution is the analysis of international, Russian, as well as departmental legal documents on information security (IS) of automated systems of internal affairs bodies of the Russian Federation (AS ATS of the Russian Federation), based on the results of the analysis of which it is necessary to develop a methodology for quantifying the level of security of the ATS of the Russian Federation. **Method.** In the course of the work, an

analysis was made of international, Russian, as well as departmental legal documents on information security of the ATS of the Russian Federation. **Result.** An exhaustive list of literature has been obtained, including international, Russian, as well as departmental legal documents on information security of the RF ATS AS. **Conclusion.** An analysis of international, Russian, as well as departmental legal documents on information security of the ATS of the Russian Federation showed that the documents on the protection of information of the ATS of the Russian Federation, as well as the methodology for quantifying the level of security of these systems, have been developed insufficiently, in particular, they are absent a system of indicators, as well as mathematical models and algorithms for assessing the level of security of the ATS of the Russian Federation, which requires significant improvement of these documents.

Keywords: assessment of the level of security, automated system, secure automated system, quantitative assessment, information security

For citation: E.A. Rogozin, I.G. Drovnikova, A.O. Efimov, V.R. Romanova. On the issue of analysis of legal documents on information security of automated systems of internal affairs bodies of the Russian Federation to assess the level of their security. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science. 2022; 49(4): 97-103. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-4-97-103

Введение. В настоящее время, существует значительное количество подходов в области защиты информации, в частности в обеспечение информационной безопасности (ИБ) автоматизированных систем (АС) ОВД РФ [10-9]. В связи с этим, появляется необходимость в выборе наиболее подходящих методологий в области ИБ, с помощью которых можно более детально узнать: терминологию в области ИБ; общие подходы к построению ИБ; общепринятые процессы ИБ и рекомендации по их выстраиванию; конкретные меры защиты ИБ; роли и зоны ответственности при построении процессов ИБ; подходы к измерению зрелости процессов ИБ; и т.д. Помимо всего вышеперечисленного, изучение и практическое применение известных методологий дает возможность грамотно обосновывать необходимость применения тех или иных мер ИБ.

Национальные стандарты информационной безопасности – это обязательные или рекомендуемые к выполнению документы, в которых определены подходы к оценке уровня ИБ и установлены требования к безопасным информационным системам [10-18].

Стандарты в области информационной безопасности выполняют следующие важнейшие функции: выработка понятийного аппарата и терминологии в области ИБ; формирование шкалы измерений уровня ИБ; согласованная оценка продуктов, обеспечивающих ИБ; повышение технической и информационной совместимости продуктов, обеспечивающих ИБ; накопление сведений о лучших практиках обеспечения ИБ.

В настоящее время в России наряду с отечественной нормативной базой широко используются международные стандарты в области информационной безопасности. Некоторые международные стандарты по защите информации приняты и введены в действие в России, но эти стандарты не составляют целостной основы для решения проблем информационной безопасности, особенно в части нормативного регулирования, методического и инструментального обеспечения разработки, оценки и сертификации безопасности информационных технологий с учетом современного уровня развития, масштабов и многообразия угроз [1-9].

Международные стандарты описывают следующие задачи: определение целей обеспечения ИБ компьютерных систем; создание эффективной системы управления ИБ; расчет совокупности детализированных не только качественных, но и количественных показателей для оценки соответствия ИБ заявленным целям; применение инструментария обеспечения ИБ и оценки ее текущего состояния.

Нормативно-правовые документы также являются основополагающим в изучении вопроса, связанных с ИБ, в них предусмотрены меры, касающиеся ответственности и наказания за нарушение правил и норм безопасности, а также информация, связанная с повышением осве-

домленности граждан в данной сфере, разработкой и распространением различных защитных технологий и средств [19-27]. В данный перечень источников необходимо включить работы ученых, связанных с обеспечением ИБ, так как проведенный анализ показал, что работ, рассмотренных в данной области много, однако они описаны не в полной мере, что требует дальнейшего анализа [28-36].

Постановка задачи. В целях получения необходимого перечня литературных источников, связанных с защитой информации АС ОВД РФ, необходимо произвести анализ международных, российских, а также ведомственных нормативно-правовых документов по информационной безопасности АС ОВД РФ. Данный анализ позволит более детально разобрать задачи, стоящие перед ОВД РФ.

Методы исследования. В результате проведенного анализа, получен значительный объем источников, связанных с информационной безопасностью АС ОВД РФ. Ниже будут рассмотрены основополагающие документы, служащие методологической опорой при решении рассматриваемой научной задачи.

Международные стандарты:

1. ГОСТ Р 54581-2011/ISO/IEC TR 15443-1:2005. Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Основы доверия к безопасности ИТ. Часть 1. Обзор и основы.

Стандарт предназначен для описания методов обеспечения доверия к безопасности, соотнесения их с базовой моделью жизненного цикла объекта и классификации методов обеспечения доверия для получения высокой степени уверенности в функциональных возможностях обеспечения безопасности объекта [1].

2. ГОСТ Р 56045-2014/ISO/IEC TR 27008:2011. Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Рекомендации для аудиторов в отношении мер и средств контроля и управления информационной безопасностью. Стандарт предоставляет руководство по проверке реализации и функционирования мер и средств контроля и управления, включая проверку технического соответствия мер и средств контроля и управления информационных систем, согласно установленным в организации стандартам по информационной безопасности [2].

3. ГОСТ Р ИСО/МЭК 13335-1-2006. Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Часть 1. Концепция и модели менеджмента безопасности информационных и телекоммуникационных технологий. Стандарт представляет собой руководство по управлению безопасностью информационных и телекоммуникационных технологий (ИТТ), устанавливает концепцию и модели, лежащие в основе базового понимания безопасности ИТТ, и раскрывает общие вопросы управления, которые важны для успешного планирования, реализации и поддержки безопасности ИТТ [3].

Национальные стандарты:

1. ГОСТ Р 50922–2006. Защита информации. Основные термины и определения. Стандарт устанавливает основные термины с соответствующими определениями, применяемые при проведении работ по стандартизации в области защиты информации [11].

2. ГОСТ Р 50739-95. Средства вычислительной техники. Защита от несанкционированного доступа к информации. Общие технические требования. Стандарт устанавливает единые функциональные требования к защите средств вычислительной техники (СВТ) от несанкционированного доступа (НСД) к информации; к составу документации на эти средства, а также номенклатуру показателей защищенности СВТ, описываемых совокупностью требований к защите и определяющих классификацию СВТ по уровню защищенности от НСД к информации [10].

3. ГОСТ Р 51188-98. Защита информации. Испытания программных средств на наличие компьютерных вирусов. Типовое руководство.

Стандарт устанавливает типовые требования, предъявляемые к испытаниям ПС на наличие КВ, в том числе: к составу мероприятий по подготовке и проведению испытаний; к составу, структуре и назначению основных частей программно-аппаратного стенда, обеспечивающего

проведение испытаний; к выбору и использованию методов проведения испытаний; к тестовым программам, обнаруживающим и уничтожающим КВ; к составу и содержанию документации, фиксирующей порядок проведения испытаний и их результаты. Настоящий стандарт предназначен для применения в испытательных лабораториях, проводящих сертификационные испытания ПС на выполнение требований защиты информации [12].

Нормативно-правовые документы:

1. Федеральный закон от 27 июля 2006 г. N 149-ФЗ «Об информации, информационных технологиях и о защите информации».

Федеральный закон регулирует отношения, возникающие при:

1) осуществлении права на поиск, получение, передачу, производство и распространение информации;

2) применении информационных технологий;

3) обеспечении защиты информации.

Положения настоящего Федерального закона не распространяются на отношения, возникающие при правовой охране результатов интеллектуальной деятельности и приравненных к ним средств индивидуализации [24].

2. Закон РФ от 21 июля 1993 г. N 5485-1 «О государственной тайне».

Данный закон устанавливает единые функциональные требования к защите средств вычислительной техники (СВТ) от несанкционированного доступа (НСД) к информации; к составу документации на эти средства, а также номенклатуру показателей защищенности СВТ, описываемых совокупностью требований к защите и определяющих классификацию СВТ по уровню защищенности от НСД к информации [19].

3. Федеральный закон от 27 июля 2006 г. N 152-ФЗ «О персональных данных».

Федеральным законом регулируются отношения, связанные с обработкой персональных данных, осуществляемой федеральными органами государственной власти, органами государственной власти субъектов РФ, иными государственными органами, органами местного самоуправления, не входящими в систему органов местного самоуправления муниципальными органами, юридическими лицами, физическими лицами с использованием средств автоматизации или без использования таких средств, если обработка персональных данных без использования таких средств соответствует характеру действий (операций), совершаемых с персональными данными с использованием средств автоматизации [25].

Работы учёных, связанные с ИБ:

1. Rogozin E.A. Способ определения комплексного показателя защищенности автоматизированных систем / Е. А. Рогозин, О. В. Ланкин, Д. А. Багаев // Вопросы защиты информации. – 2009. – № 2(85). – С. 8-10.

Предложен способ определения обобщенного показателя защищенности автоматизированных систем и эффективности систем защиты информации от несанкционированного доступа. Вычисление показателя осуществляется с использованием структуры требований, содержащейся в «Общих критериях» и в соответствующем российском аналоге ГОСТ Р 15408-2-2002 [29].

2. Язов Ю.К. Информационные риски в условиях применения технологии виртуализации в информационно-телекоммуникационных системах / Ю. К. Язов, В. Н. Сигитов // Информатика и безопасность. – 2013. – Т. 16. – № 3. – С. 403-406.

Приводятся особенности технологии виртуализации, указываются связанные с ними специфические угрозы безопасности информации и информационные риски, обусловленные возможностью реализации таких угроз. Отмечается необходимость разработки новых и совершенствования существующих способов и средств защиты, предназначенных для нейтрализации угроз безопасности информации, обрабатываемой в информационно-телекоммуникационных системах с применением, технологии виртуализации [32].

3. Авсентьев О.С. Обеспечение защиты информации в процессе создания информацион-

ной системы объекта информатизации / О. С. Авсентьев, А. Г. Вальде, Ю. В. Конкин // Вестник Воронежского института МВД России. – 2021. – № 3. – С. 36-48.

Рассматриваются вопросы обеспечения защиты информации, содержащей сведения о видах информации, ее материальных носителях, структурно-функциональных характеристиках информационной системы объекта информатизации и взаимосвязях между его структурными элементами. Учитываются условия, характеризующие динамику выполнения нарушителем действий по добыванию такого рода сведений путем преодоления мер защиты информации информационно-сигнализационной системы контроля и ограничения доступа на территорию проектируемого объекта, а также действий легитимных пользователей по блокированию утечки за счет применения превентивных мер защиты этой информации. Предложен показатель оценки защищенности информации от утечки. Обоснован подход к разработке математической модели для расчета этого показателя [36].

Вывод. Анализ международных, российских, а также ведомственных нормативно-правовых документов по информационной безопасности АС ОВД РФ показал, что документы, посвященные защите информации АС ОВД РФ, а также методика количественной оценки уровня защищенности этих систем проработана в недостаточном объеме, в частности, отсутствуют система показателей, а также математические модели и алгоритмы оценки уровня защищенности АС ОВД РФ, что требует значительного совершенствования этих документов.

Библиографический список:

1. ГОСТ Р 54581-2011 / ISO/IEC TR 15443-1:2005. Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Основы доверия к безопасности ИТ. Часть 1. Обзор и основы. 2012. 27 с.
2. ГОСТ Р 54582-2011 / ISO/IEC TR 15443-2:2005. Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Основы доверия к безопасности информационных технологий. Часть 2. Методы доверия. 2019. 52 с.
3. ГОСТ Р 54583-2011 / ISO/IEC TR 15443-3:2007. Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Основы доверия к безопасности информационных технологий. Часть 3. Анализ методов доверия. 2011. 54 с.
4. ГОСТ Р 56045-2014 / ISO/IEC TR 27008:2011. Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Рекомендации для аудиторов в отношении мер и средств контроля и управления информационной безопасностью. 2014. 44 с.
5. ГОСТ Р ИСО/МЭК 13335-1-2006. Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Часть 1. Концепция и модели менеджмента безопасности информационных и телекоммуникационных технологий. 2006. 23 с.
6. ГОСТ Р ИСО 7498-1-99. Информационная технология. Взаимосвязь открытых систем. Базовая эталонная модель. Часть 1. Базовая модель. 2006. 62 с.
7. ГОСТ Р ИСО 7498-2-99. Информационная технология. Взаимосвязь открытых систем. Базовая эталонная модель. Часть 2. Архитектура защиты информации. 1999. 39 с.
8. ГОСТ Р ИСО/МЭК ТО 13335-5-2006. Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Часть 5. Руководство по менеджменту безопасности сети. 2006. 33 с.
9. ГОСТ Р ИСО/МЭК 15408-1-2012. Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Критерии оценки безопасности информационных технологий. Часть 1. Введение и общая модель. 2012. 56 с.
10. ГОСТ Р 50739-95. Средства вычислительной техники. Защита от несанкционированного доступа к информации. Общие технические требования. 2006. 10 с.
11. ГОСТ Р 50922-2006. Защита информации. Основные термины и определения // М.: Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. 2006. 12 с.
12. ГОСТ Р 51188-98. Защита информации. Испытания программных средств на наличие компьютерных вирусов. Типовое руководство. 1998. 8 с.
13. ГОСТ Р 51275-2006. Защита информации. Объект информатизации. Факторы, воздействующие на информацию. Общие положения. 2006. 11 с.
14. ГОСТ Р 51583-2014. Защита информации. Порядок создания автоматизированных систем в защищенном исполнении. Общие положения. 2014. 18 с.
15. ГОСТ Р 52069.0-2013. Защита информации. Система стандартов. Основные положения. 2013. 15 с.
16. ГОСТ Р 52447-2005. Защита информации. Техника защиты информации. Номенклатура показателей качества. 2005. 27 с.
17. ГОСТ Р 52448-2005. Защита информации. Обеспечение безопасности сетей электросвязи. Общие положения. 2005. 19 с.
18. ГОСТ Р 52633.0-2006. Защита информации. Техника защиты информации. Требования к средствам высоконадежной биометрической аутентификации. 2006. 24 с.
19. Закон РФ от 21 июля 1993 г. N 5485-1 «О государственной тайне».
20. Федеральный закон от 27 декабря 2002 г. N 184-ФЗ «О техническом регулировании».
21. Федеральный закон от 07 июля 2003 г. N 126-ФЗ «О связи».
22. Федеральный закон от 29 июля 2004 г. N 98-ФЗ «О коммерческой тайне».

23. Федеральный закон от 19 декабря 2005 г. N 160-ФЗ «О ратификации Конвенции Совета Европы о защите физических лиц при автоматизированной обработке персональных данных».
24. Федеральный закон от 27 июля 2006 г. N 149-ФЗ «Об информации, информационных технологиях и о защите информации».
25. Федеральный закон от 27 июля 2006 г. N 152-ФЗ «О персональных данных».
26. Федеральный закон от 28 декабря 2010 г. N 390-ФЗ «О безопасности».
27. Федеральный закон от 06 апреля 2011 г. N 63-ФЗ «Об электронной подписи».
28. Применение метода топологического преобразования стохастических сетей для оценки эффективности средств защиты / В. В. Баранов, А. М. Крибель, О. С. Лаута, А. П. Нечепуренко // Актуальные проблемы обеспечения информационной безопасности : труды Межвузовской научно-практической конференции, Самара, 20–24 мая 2017 года. – Самара: Инсома-Пресс, 2017. – С. 47-52. – EDN ZAMPAR.
29. Рогозин Е. А. Способ определения комплексного показателя защищенности автоматизированных систем / Е. А. Рогозин, О. В. Ланкин, Д. А. Багаев // Вопросы защиты информации. – 2009. – № 2(85). – С. 8-10.
30. Недопека А. С. Анализ защищенности автоматизированных систем по организации грузоперевозок / А. С. Недопека, К. И. Бушмелева // Национальная Ассоциация Ученых. 2015. – № 10-1(16). – С. 32-35.
31. Авраменко В. С. Модель для количественной оценки защищенности информации от несанкционированного доступа в автоматизированных системах по комплексному показателю / В. С. Авраменко, А. В. Козленко // Труды СПИИРАН. – 2010. – № 2(13). – С. 172-181. – EDN NCNPZV.
32. Язов Ю. К. Информационные риски в условиях применения технологии виртуализации в информационно-телекоммуникационных системах / Ю. К. Язов, В. Н. Сигитов // Информация и безопасность. – 2013. – Т. 16. – № 3. – С. 403-406. – EDN RVMKBN.
33. Методы оценивания защищенности информации в автоматизированных системах от несанкционированного доступа / А. В. Непомнящих, Г. В. Куликов, Ю. В. Соснин, П. А. Нащекин // Вопросы защиты информации. – 2014. – № 1(104). – С. 3-12. – EDN QDNKMA.
34. Никитин А. А. Методический подход к оценке защищенности автоматизированных систем органов внутренних дел на основе требований нормативной документации / А. А. Никитин, И. Г. Дровникова // Общественная безопасность, законность и правопорядок в III тысячелетии. – 2015. – № 1-3. – С. 131-133. – EDN VRBQLD.
35. Соловьев С. В. Информационное обеспечение деятельности по технической защите информации / С. В. Соловьев, Ю. К. Язов // Вопросы кибербезопасности. – 2021. – № 1(41). – С. 69-79. – DOI 10.21681/2311-3456-2021-1-69-79. – EDN AOEUFT.
36. Авсентьев О. С. Обеспечение защиты информации в процессе создания информационной системы объекта информатизации / О. С. Авсентьев, А. Г. Вальде, Ю. В. Конкин // Вестник Воронежского института МВД России. – 2021. – № 3. – С. 36-48. – EDN FJUSGI.

References:

1. GOST R 54581-2011 / ISO/IEC TR 15443-1:2005. Information technology. Methods and means of ensuring security. Fundamentals of trust in IT security. Part 1. Overview and basics. 2012; 27.
2. GOST R 54582-2011 / ISO/IEC TR 15443-2:2005. Information technology. Methods and means of ensuring security. Fundamentals of trust in information technology security. Part 2. Methods of trust. 2019; 52 .
3. GOST R 54583-2011 / ISO/IEC TR 15443-3:2007. Information technology. Methods and means of ensuring security. Fundamentals of trust in information technology security. Part 3. Analysis of trust methods. 2011; 54.
4. GOST R 56045-2014 / ISO/IEC TR 27008:2011. Information technology. Methods and means of ensuring security. Recommendations for auditors regarding measures and means of control and management of information security. 2014; 44 .
5. GOST R ISO/IEC 13335-1-2006. Information technology. Methods and means of ensuring security. Part 1. The concept and models of information and telecommunication technology security management. 2006; 23.
6. GOST R ISO 7498-1-99. Information technology. The relationship of open systems. The basic reference model. Part 1. Basic model. 2006; 62.
7. GOST R ISO 7498-2-99. Information technology. The relationship of open systems. The basic reference model. Part 2. Information security architecture. 1999. 39 p .
8. GOST R ISO/IEC TO 13335-5-2006. Information technology. Methods and means of ensuring security. Part 5. Network Security Management Guide. 2006. 33 with
9. GOST R ISO/IEC 15408-1-2012. Information technology. Methods and means of ensuring security. Criteria for assessing the security of information technologies. Part 1. Introduction and general model. 2012. 56 p.
10. GOST R 50739-95. Computer equipment. Protection against unauthorized access to information. General technical requirements. 2006. 10 p.
11. GOST R 50922-2006. Information protection. Basic terms and definitions // Moscow: Federal Agency for Technical Regulation and Metrology. 2006. 12 c.
12. GOST R 51188-98. Information protection. Testing of software for the presence of computer viruses. Model manual. 1998. 8 p.
13. GOST R 51275-2006. Information protection. The object of informatization. Factors affecting information. General provisions. 2006. 11 p.
14. GOST R 51583-2014. Information protection. The procedure for creating automated systems in a protected version. General provisions. 2014. 18 p.
15. GOST R 52069.0-2013. Information protection. The system of standards. The main provisions. 2013. 15 p.
16. GOST R 52447-2005. Information protection. Information security techniques. The nomenclature of quality indicators. 2005. 27 p.
17. GOST R 52448-2005. Information protection. Ensuring the security of telecommunication networks. General provisions. 2005. 19 p.
18. GOST R 52633.0-2006. Information protection. Information security techniques. Requirements for highly reliable biometric

authentication tools. 2006. 24 p.

19. The Law of the Russian Federation of July 21, 1993 N 5485-1 "On state secrets".
20. Federal Law No. 184-FZ of December 27, 2002 "On Technical Regulation".
21. Federal Law No. 126-FZ of July 07, 2003 "On Communications".
22. Federal Law No. 98-FZ of July 29, 2004 "On Trade Secrets".
23. Federal Law No. 160-FZ of December 19, 2005 "On Ratification of the Council of Europe Convention on the Protection of Individuals with Automated Processing of Personal Data".
24. Federal Law No. 149-FZ of July 27, 2006 "On Information, Information Technologies and Information Protection".
25. Federal Law No. 152-FZ of July 27, 2006 "On Personal Data".
26. Federal Law No. 390-FZ of December 28, 2010 "On Security".
27. Federal Law No. 63-FZ of April 06, 2011 "On Electronic Signature".
28. Application of the method of topological transformation of stochastic networks for evaluating the effectiveness of protective equipment / V. V. Baranov, A.M. Kribel, O. S. Lauta, A. P. Nechepurenko. *Actual problems of information security : Proceedings of the Interuniversity Scientific and Practical Conference*, Samara, May 20-24, 2017; Samara: Insoma-Press, 2017; 47-52. – EDN ZAMPAR.
29. Rogozin, E. A. A method for determining a complex indicator of the security of automated systems / E. A. Rogozin, O. V. Lankin, D. A. Bagaev. *Questions of information protection*. 2009; 2(85): 8-10.
30. Nedopek, A. S. Analysis of the security of automated systems for the organization of cargo transportation / A. S. Nedopek, K. I. Bushmeleva. *National Association of Scientists*. 2015; 10-1(16): 32-35.
31. Avramenko, V. S. A model for quantifying the security of information from unauthorized access in automated systems by a complex indicator / V. S. Avramenko, A.V. Kozlenko. *Proceedings of SPIIRAN*. 2010; 2(13): 172-181.
32. Yazov, Yu. K. Information risks in the conditions of application of virtualization technology in information and telecommunication systems / Yu. K. Yazov, V. N. Sigitov // *Information and security*. 2013; 16 (3): 403-406.
33. Methods of assessing the security of information in automated systems from unauthorized access / A.V. Nepomnyashchikh, G. V. Kulikov, Yu. V. Sosnin, P. A. Nashchekin. *Questions of information protection*. 2014;1(104):3-12.
34. Nikitin, A. A. Methodological approach to assessing the security of automated systems of internal affairs bodies based on the requirements of regulatory documentation / A. A. Nikitin, I. G. Drovnikova. *Public safety, legality and law and order in the III millennium*. 2015;1-3: 131-133. EDN VRBQLD.
35. Soloviev, S. V. Information support of activities on technical protection of information / S. V. Soloviev, Yu. K. Yazov *Issues of cybersecurity*. 2021;1(41): 69-79. DOI 10.21681/2311-3456-2021-1-69-79. – EDN AOEUFT.
36. Avsentiev, O. S. Ensuring information protection in the process of creating an informatization system of an informatization object / O. S. Avsentiev, A. G. Valde, Yu. V. Konkin. *Bulletin of the Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia*. 2021; 3:36-48. EDN FJUSGI.

Сведения об авторах:

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

Дровникова Ирина Григорьевна, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры автоматизированных информационных систем органов внутренних дел; drovnikova@mail.ru

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

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

Information about authors:

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

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

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

Victoria R. Romanova, adjunct of full-time education; romanovna_vika@inbox.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 23.09.2022.

Одобрена после рецензирования/ Revised 12.10.2022.

Принята в печать/Accepted for publication 12.10.2022.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 519.6

DOI: 10.21822/2073-6185-2022-49-4-104-112

Оригинальная статья /Original Paper

Численный метод и математическая модель нахождения равновесного состава термодинамической системы программного комплекса T-Energy

П.А. Сеченов, И.А. Рыбенко

Сибирский государственный индустриальный университет,
654007, г. Новокузнецк, Центральный р-н, ул. Кирова, зд. 42, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является разработка математической модели и численных методов нахождения равновесного состава термодинамической системы. **Метод.** Для нахождения равновесного состава термодинамической системы использовалось сочетание численных методов: Лагранжа, Ньютона – Рафсона и Гаусса. **Результат.** Проведен анализ существующих программных комплексов и используемых в них численных методов для расчета термодинамических систем. Разработана математическая модель, состоящая из численных методов Лагранжа (позволяет перейти от условной задачи к безусловной); Ньютона – Рафсона (приближенный метод решения нелинейной системы уравнений); Гаусса (решение линейной системы уравнений). Для сходимости метода Ньютона – Рафсона произведена замена искомых величин на их квадраты, а также для каждой величины заданы диапазоны изменения. Сравнение вычислений равновесного состава с программой Terra показывают удовлетворительные результаты. **Вывод.** Программный комплекс T-Energy позволяет рассчитывать равновесный состав для термодинамической системы.

Ключевые слова: численный метод, поиск максимума, нелинейные уравнения, термодинамическая система, метод Ньютона – Рафсона

Для цитирования: П.А. Сеченов, И.А. Рыбенко. Численный метод и математическая модель нахождения равновесного состава термодинамической системы программного комплекса T-Energy. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022; 49(4):104-112. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-4-104-112

Numerical method and mathematical model for finding the equilibrium composition of the thermodynamic system of the T-Energy software package

P.A. Sechenov, I.A. Rybenko

Siberian State Industrial University,
42 Kirov Str., Central district, Novokuznetsk 654007, Russia

Abstract. Objective. The aim of the study is to develop a mathematical model and numerical methods for finding the equilibrium composition of a thermodynamic system. **Method.** To find the equilibrium composition of the thermodynamic system, a combination of numerical methods was used: Lagrange, Newton–Raphson and Gauss. **Result.** The analysis of existing software systems and numerical methods used in them for the calculation of thermodynamic systems is carried out. Based on the analysis, practical implementation attempts, it was possible to develop a mathematical model consisting of numerical Lagrange methods (allows you to move from a conditional problem to an unconditional one); Newton–Raphson (an approximate method for solving a nonlinear system of equations); Gauss (solving a linear system of equations). For the convergence of the Newton–Raphson method, the required quantities were replaced by their squares, and ranges of variation were set for each quantity. The results of comparing the calculations of the equilibrium composition with the Terra program show satisfactory results. **Conclusion.** The T-Energy software package allows you to calculate the equilibrium composition for a thermodynamic system.

Keywords: numerical method, maximum search, nonlinear equations, thermodynamic system, Newton–Raphson method

For citation: P.A. Sechenov, I.A. Rybenko. Numerical method and mathematical model for finding the equilibrium composition of the thermodynamic system of the T-Energy software package. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science. 2022; 49(4): 104-112. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-4-104-112

Введение. Большинство технологических процессов относятся к сложным системам, для которых характерными являются многомерность, гетерогенность, нестационарность, стохастичность, нелинейность, наличие многочисленных прямых и обратных связей. Решение таких задач исследования и оптимизации требует использования аппарата математических моделей.

С использованием законов термодинамики можно решать две важные для металлургии группы задач. Первая связана с составлением энергетических балансов, вторая – с определением характеристик равновесного состояния. Обе эти задачи основаны на фундаментальных законах – первом и втором началах термодинамики.

Постановка задачи. На основании термодинамических расчетов при различной степени отклонения системы от равновесия и выполнении законов сохранения массы и энергии можно оценить поведение компонентов на различных стадиях технологического процесса, и, следовательно, предсказать оптимальные условия для получения продукта необходимого качества, определить наиболее экономичный способ ведения процесса.

Одним из подходов к построению термодинамических моделей является полный термодинамический анализ, позволяющий решать три взаимосвязанные задачи: нахождение термодинамических свойств отдельных компонентов системы по известному составу и значениям термодинамических функций; определение равновесного состава системы по свойствам составляющих ее компонентов; оценка фактического текущего неравновесного стационарного состояния системы и степени ее отклонения от равновесия.

Методы исследования. Методика термодинамического анализа равновесного состояния многокомпонентных гетерогенных систем известна давно. Важный вклад в создании замкнутой системы уравнений этой теории внесли работы Гиббса. Однако из-за сложности решения больших систем нелинейных алгебраических уравнений вручную эта методика долгое время практически не использовалась, а термодинамика процесса оценивалась по отдельным реакциям, что приводило к существенным ошибкам, особенно для сложных процессов, когда число компонентов системы достигает нескольких десятков. Только с появлением ЭВМ методики расчета сложных термодинамических систем начали использоваться достаточно широко [1 – 6].

Объектом термодинамического анализа является термодинамическая система – условно выделенная материальная область, взаимодействие которой с окружающей средой сводится к обмену веществом и энергией. Термодинамическое равновесие – это предельное состояние, к которому стремится термодинамическая система, при этом в каждой точке устанавливается термическое, механическое и химическое равновесие (происходит выравнивание температуры и давления, и все возможные химические реакции протекают до конца).

С точки зрения взаимодействия с окружающей средой можно выделить изолированные, закрытые и открытые системы. В изолированной системе нет обмена с окружающей средой веществом и энергией. Замкнутая система отличается постоянством общей массы, нет обмена с окружающей средой веществом, но возможен обмен энергией. В открытых системах, которыми являются реальные технологические объекты, происходит обмен с окружающей средой, как веществом, так и энергией. В зависимости от типа систем существует четыре подхода к расчету равновесного состояния многокомпонентной гетерогенной системы. При расчете замкнутых систем используются методы, основанные на законе действующих масс или использующие нахождение минимума изобарно-изотермического потенциала системы. Для них также применим метод равенства химических потенциалов. При расчете изолированной системы основополагающим является принцип максимума энтропии. Расчет открытых систем предполагает использование методов как равновесной, так и неравновесной термодинамики.

Исторически первыми были разработаны методы, основанные на законе действующих масс независимых реакций в системе, но в связи с большим количеством недостатков (необходимость выбора независимых реакций при составлении системы уравнений, отсутствие достоверных данных по константам равновесия для многих реакций; отсутствие универсальных теорий строения конденсированных фаз; необходимость наличия качественной предварительной оценки равновесного состояния) они не нашли широкого применения. Альтернативными константному методу являются методы, основанные на вариационных принципах термодинамики, сущность которых заключается в нахождении экстремума термодинамического потенциала системы: минимума изобарно-изотермического потенциала или максимума энтропии.

Основным условием применимости этого метода является изолированность термодинамической системы. На практике условие изолированности означает, что процессы установления равновесия протекают гораздо быстрее, чем происходят изменения на границах системы (т.е. изменения внешних по отношению к системе условий) и осуществляется обмен системы с окружением веществом и энергией. Принцип максимума энтропии для изолированной системы в равновесном состоянии может быть сформулирован следующим образом:

$$S \rightarrow S_{\max} \text{ при } \sum n_i = \text{const}, U_{II} = \text{const}, V = \text{const}, \quad (1)$$

где U_{II} – полная энергия системы, кДж; V – объем, м³; S – энтропия, кДж/моль·К; n_i – количество вещества i -го компонента, моль.

Изолированность системы от окружающей среды выражается в форме законов сохранения массы и энергии. При определении параметров равновесного состояния находятся значения всех зависимых переменных, включая числа молей компонентов, при которых величина энтропии достигает максимума. При отыскании экстремума на величины искомым неизвестных налагаются ограничения, отражающие условия существования системы.

Принцип максимума энтропии применим также в большинстве случаев в системах, где реализуется неполное равновесие [7]. При неполном равновесии возможны три варианта: равновесие достигается в какой-либо части (или частях) относительно большой по размерам системы – локальное равновесие; неполное равновесие достигается вследствие разности скоростей релаксационных процессов, протекающих в системе – частичное равновесие; имеют место как локальное, так и частичное равновесие.

Для того чтобы исследовать методами равновесной термодинамики неравновесный процесс, протекающий в некоторой протяженной области, эту область разбивают на достаточно мелкие части (термодинамические системы), в каждой из которых достигается состояние равновесия, и производят расчет состава и свойств для каждой из них. На основании полученных результатов определяются характеристики процесса. Если в системе существует частичное равновесие, то при проведении расчета состава следует учитывать ограничения, обусловленные кинетическими факторами. Для этой цели можно исключить из рассмотрения часть веществ или зафиксировать их концентрации, если известно, что химические реакции с их участием не успевают пройти. В этом случае часть реакций замораживается. Основными достоинствами методики, основанной на принципе максимума энтропии [8, 9], является возможность расчета высокотемпературного равновесного состояния любой сложной многомерной гетерогенной системы на основании одних фундаментальных законов термодинамики независимо от условий и способов достижения равновесия при минимуме информации о системе.

Данный подход при моделировании сложных многокомпонентных термодинамических систем реализован в инструментальной системе T-Energy [10]. Программа содержит обширную базу данных по термодинамическим свойствам индивидуальных веществ [11], модуль расчета термодинамических функций химических реакций [12] и модуль расчета равновесного состояния термодинамической системы на основе принципа максимума энтропии. В общем случае энтропию системы можно представить в виде суммы энтропии составляющих компонентов [7]:

$$s = \sum_{k=1}^K s_k^{(p_k)} n_k + \sum_{q=1}^Q s_q n_q = \sum_{k=1}^K \left(s_k^0 - R_0 \ln \frac{R_0 T n_k}{V} \right) n_k + \sum_{q=1}^Q s_q^0 n_q, \quad (2)$$

где $s_k^{(p_k)}$ – энтропия i -ой компоненты газовой фазы, кДж/моль·К; p_k – парциальное давление, мПа; s_k – энтропия k -й компоненты газовой фазы при температуре T и нормальном атмосферном давлении, кДж/моль·К; R_0 – универсальная газовая постоянная; K – количество компонент в газовой фазе, Q – количество компонент в конденсированной фазе; n – концентрации компонент соответствующей фазы в относительных единицах.

Решая уравнение (2) относительного полного приведенного изобарно-изотермического потенциала Гиббса

$$F = s - I / T, \quad (3)$$

где I – полная энтальпия, получаем уравнение для приведенной энергии Гиббса:

$$F = \sum_{k=1}^K F_k^0 n_k - \sum_{k=1}^K n_k \cdot \ln \left(\sum_{k=1}^K n_k \right) + \sum_{k=1}^K (n_k \cdot \ln(n_k)) + \sum_{q=1}^Q F_q^0 n_q \quad (4)$$

Это уравнение является нелинейным из-за газовой составляющей. При смешении идеальных газов, возникает парадокс Гиббса [13], который отражается в выражении (4) в виде логарифмических составляющих.

Для решения задачи поиска экстремума приведенной энергии Гиббса разработан численный метод, основанный на применении методов Лагранжа [14 – 15], Ньютона – Рафсона [16, 17] и Гаусса [18].

Метод Лагранжа используется для математической записи задачи в виде нелинейных уравнений. Для решения системы нелинейных уравнений применяется метод Ньютона – Рафсона, на каждой итерации которого используется метод Гаусса для нахождения экстремума по каждой переменной.

Представим термодинамическую систему в виде смеси индивидуальных веществ, взаимодействующих между собой, и в результате этого взаимодействия система приходит в конечное равновесное состояние. Ограничения на количество вещества по каждому компоненту системы представлены уравнениями (5):

$$\begin{cases} n_{in,1} = \sum_{u=1}^U m_{u,1} \cdot n_{u,1} \\ \dots \\ n_{in,R} = \sum_{u=1}^U m_{u,R} \cdot n_{u,R} \end{cases} \quad (5)$$

где $n_{in,1}$ – исходное количество 1-го вещества в термодинамической системе, моль; R – количество исходных веществ, U – количество возможных веществ в равновесном состоянии системы; $m_{u,r}$ – максимально возможное количество вещества в системе; $n_{u,r}$ – количество u -го вещества в конечном равновесном состоянии, моль.

После включения ограничений (5) в целевую функцию в виде функции Лагранжа, получаем следующее уравнение для приведенной энергии Гиббса:

$$F = \sum_{k=1}^K F_k^0 n_k - \sum_{k=1}^K n_k \cdot \ln \left(\sum_{k=1}^K n_k \right) + \sum_{k=1}^K (n_k \cdot \ln(n_k)) + \sum_{q=1}^Q F_q^0 n_q + \sum_{r=1}^R l_r \cdot \left(\sum_{u=1}^U m_{u,r} \cdot n_{u,r} - n_{in,r} \right) \quad (6)$$

Продифференцировав целевую функцию (6) по количеству веществ (от q до Q для твердых веществ) и (от k до K для газов), а также по неопределенным множителям Лагранжа l (от r до R), получаем систему нелинейных уравнений.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial F}{\partial n_q} = F_q + \sum_{r=1}^R m_{q,r} \cdot l_r = 0; \\ \dots \\ \frac{\partial F}{\partial n_Q} = F_Q + \sum_{r=1}^R m_{Q,r} \cdot l_r = 0; \\ \dots \\ \frac{\partial F}{\partial n_k} = F_k + \sum_{r=1}^R m_{k,r} \cdot l_r - \ln(n_k) + \ln\left(\sum_{k=1}^K n_k\right) = 0; \\ \dots \\ \frac{\partial F}{\partial n_K} = F_K + \sum_{r=1}^R m_{K,r} \cdot l_r - \ln(n_K) + \ln\left(\sum_{k=1}^K n_k\right) = 0; \\ \dots \\ \frac{\partial F}{\partial l_r} = \sum_{u=1}^U m_{u,r} \cdot n_{u,r} - n_{in,r} = 0; \\ \dots \\ \frac{\partial F}{\partial l_R} = \sum_{u=1}^U m_{u,R} \cdot n_{u,R} - n_{in,R} = 0. \end{array} \right. \quad (7)$$

Обсуждение результатов. Для решения системы нелинейных уравнений (7) использовали метод Ньютона – Рафсона.

Проблема сходимости метода Ньютона – Рафсона решена благодаря введению новых неизвестных и замене $n_t = z_t^2$ в уравнении (6).

Систему уравнений (5) с учетом замены можно представить в следующем виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial F}{\partial z_q} = 2 \cdot z_q \cdot \left(F_q + \sum_{r=1}^R m_{q,r} \cdot l_r \right) = 0; \\ \dots \\ \frac{\partial F}{\partial z_Q} = 2 \cdot z_Q \cdot \left(F_Q + \sum_{r=1}^R m_{Q,r} \cdot l_r \right) = 0; \\ \dots \\ \frac{\partial F}{\partial z_k} = 2 \cdot z_k \cdot \left(F_k + \sum_{r=1}^R m_{k,r} \cdot l_r - 2 \cdot \ln(z_k) + \ln\left(\sum_{k=1}^K z_k^2\right) \right) = 0; \\ \dots \\ \frac{\partial F}{\partial z_K} = 2 \cdot z_K \cdot \left(F_K + \sum_{r=1}^R m_{K,r} \cdot l_r - 2 \cdot \ln(z_K) + \ln\left(\sum_{k=1}^K z_k^2\right) \right) = 0; \\ \dots \\ \frac{\partial F}{\partial l_r} = \sum_{u=1}^U m_{u,r} \cdot n_{u,r}^2 - n_{in,r} = 0; \\ \dots \\ \frac{\partial F}{\partial l_R} = \sum_{u=1}^U m_{u,R} \cdot n_{u,R}^2 - n_{in,R} = 0. \end{array} \right. \quad (8)$$

Значения производных в системе уравнений (8) обозначим, как вектор $F(\bar{z}, \bar{l})$.

В общем виде метод Ньютона для системы нелинейных уравнений представлен уравнением:

$$F(\bar{z}, \bar{l}) \approx F(\bar{z}^{(0)}, \bar{l}^{(0)}) + H(\bar{z}^{(0)}, \bar{l}^{(0)}) \cdot g(\Delta \bar{z}, \Delta \bar{l})$$

где $F(\bar{z}^{(0)}, \bar{l}^{(0)})$ – вектор начальных значений, $H(\bar{z}^{(0)}, \bar{l}^{(0)})$ – Гессиан, $g(\Delta \bar{z}, \Delta \bar{l})$ – вектор приращения значений.

Матрица Гессе (Гессиан) функции F имеет вид:

$$H(\bar{z}, \bar{l}) = \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 F}{\partial z_1^2} & \dots & \frac{\partial^2 F}{\partial z_1 \partial z_{K+Q}} & \frac{\partial^2 F}{\partial z_1 \partial z_{K+Q+r}} & \dots & \frac{\partial^2 F}{\partial z_1 \partial z_{K+Q+R}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial^2 F}{\partial z_{K+Q} \partial z_1} & \dots & \frac{\partial^2 F}{\partial z_{K+Q}^2} & \frac{\partial^2 F}{\partial z_{K+Q} \partial z_{K+Q+r}} & \dots & \frac{\partial^2 F}{\partial z_{K+Q} \partial z_{K+Q+R}} \\ \frac{\partial^2 F}{\partial z_{K+Q+r} \partial z_1} & \dots & \frac{\partial^2 F}{\partial z_{K+Q+r} \partial z_{K+Q}} & \frac{\partial^2 F}{\partial z_{K+Q+r}^2} & \dots & \frac{\partial^2 F}{\partial z_{K+Q+r} \partial z_{K+Q+R}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial^2 F}{\partial z_{K+Q+R} \partial z_1} & \dots & \frac{\partial^2 F}{\partial z_{K+Q+R} \partial z_{K+Q}} & \frac{\partial^2 F}{\partial z_{K+Q+R} \partial z_{K+Q+r}} & \dots & \frac{\partial^2 F}{\partial z_{K+Q+R}^2} \end{pmatrix} \quad (9)$$

Определив производные, можно выделить области с однотипными значениями и значениями равными нулю.

$$H(\bar{z}, \bar{l}) = \begin{pmatrix} D_1 & \dots & G_{1,K+Q} & V_{1,K+Q+r} & \dots & V_{1,K+Q+R} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ G_{K+Q,1} & \dots & D_{K+Q} & V_{K+Q,K+Q+r} & \dots & V_{K+Q,K+Q+R} \\ V_{K+Q+r,1} & \dots & V_{K+Q+r,K+Q} & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & 0 & 0 & 0 \\ V_{K+Q+R,1} & \dots & V_{K+Q+R,K+Q} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (10)$$

Элементы главной диагонали D_i вычисляются с помощью следующего соотношения:

$$D_j = \begin{cases} 2 \cdot \left(F_j + \sum_{q=1}^Q m_{j,r} \cdot l_r \right), & \text{если фаза конденсированная} \\ 2 \cdot \left(F_j + \sum_{k=1}^K m_{j,k} \cdot l_k + 2 \cdot \ln(z_j) - \ln \left(\sum_{k=1}^K z_k^2 \right) + 2 - \frac{2 \cdot z_j}{\sum_{k=1}^K z_k^2} \right), & \text{если фаза газообразная} \end{cases} \quad (11)$$

При этом индекс k в z_k соответствует газообразным веществам.

Вторые производные по ограничениям имеют общую формулу:

$$V_{ij} = \begin{cases} V_{K+Q+r,u} = m_{ru} \cdot (2 \cdot z_r), & \text{если номер строки} > \text{номера столбца} \\ V_{u,K+Q+r} = m_{ur} \cdot (2 \cdot z_r), & \text{если номер строки} < \text{номера столбца} \end{cases} \quad (12)$$

При этом $V_{ij} = V_{ji}$, где $i = 1+U, \dots, R+U$; $j = 1, \dots, U$, где R – количество реагентов, U – количество продуктов реакций.

Для газовых веществ получается общая формула:

$$G_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{если фаза конденсированная} \\ -4 \cdot z_i \cdot z_j, & \text{если фаза газообразная} \\ \sum_{j=1}^K z_j^2 \end{cases} \quad (13)$$

где i – номер столбца, а j – номер строки.

Следующим этапом является нахождение изменения по искомым переменным с помо-

щью метода Гаусса. Каждый элемент матрицы (10) по столбцам умножается на изменение по координате (вектор приращений):

$$H(\bar{z}^{(0)}, \bar{l}^{(0)}) \cdot g(\Delta \bar{z}^{(1)}, \Delta \bar{l}^{(1)}) = -F(\bar{z}^{(0)}, \bar{l}^{(0)}) \quad (14)$$

$$\text{где } \Delta \bar{z} = \bar{z}^{(i+1)} - \bar{z}^{(i)}, \Delta \bar{l} = \bar{l}^{(i+1)} - \bar{l}^{(i)}.$$

Методом Гаусса (система из уравнений становится линейной) определяются такие изменения $\Delta \bar{z}$ и $\Delta \bar{l}$, при которых значение невязки по каждой строке из формулы (8) и сумма по строке из матриц (10) равнялись бы нулю.

Значение $\bar{z}^{(i+1)}$ на новом шаге для химических элементов вычисляются по формуле.

$$\bar{z}^{(i+1)} = \bar{z}^{(i)} + \Delta \bar{z}^{(i)} \cdot \bar{w}^{(i)} \quad (15)$$

где i – номер итерации, $w^{(i)}$ – коэффициент, учитывающий ограничения по значению переменной, таким образом что $z^{(i+1)}$ не могла бы быть меньше или равна нулю и не могла быть больше максимального значения $z_{\max}^{(i)}$.

Если новое значение больше нуля и меньше максимально допустимого, то

$$0 < z^{(i+1)} \leq z_{\max}^{(i)}, \text{ то } w^{(i)} = 0,1.$$

Если новое значение меньше нуля, то $z^{(i+1)} \leq 0$, то $w^{(i)} = -z^{(i)} / \Delta z^{(i)} \cdot 0,97$.

Если новое значение больше максимально допустимого: $z^{(i+1)} > z_{\max}^{(i)}$, то $w^{(i)} = (z_{\max}^{(i)} - z^{(i)}) / \Delta z^{(i)} \cdot 0,97$.

Таким образом, реализуется одна итерация. На следующей итерации рассчитывается матрица Гессе (10), с учетом полученных значений $z^{(1)}$ и $l^{(1)}$, а с помощью метода Гаусса находят новые значения $z^{(2)}$ и $l^{(2)}$. Итерационный процесс завершается, когда изменения по всем переменным окажутся меньше требуемой точности (как показано на рис. 1).



Рис.1. Алгоритм применения численных методов в математической модели нахождения равновесного состава термодинамической системы

Fig.1. An algorithm for applying numerical methods in a mathematical model for finding the equilibrium composition of a thermodynamic system

В случае, когда метод Ньютона – Рафсона расходится, то есть получают бесконечно большие или бесконечно малые значения, применяется Симплекс метод.

Вывод. Разработанный алгоритм был протестирован для 50-ти исходных наборов из

двух и трех исходных веществ при трех различных температурах и значения, получаемые в разработанной программе и в программе Тетра [7, 9], совпадают.

Данный метод используется в программе Т-Energy и позволяет рассчитать равновесное состояние сложных многокомпонентных гетерогенных систем.

Библиографический список:

1. Барбин Н.М., Сидаш И.А., Терентьев Д.И., Алексеев С.Г. Компьютерное моделирование термических процессов с участием радионуклидов U, Cl, Pu, Be, Ni, Am при нагревании радиоактивного графита в атмосфере углекислого газа // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. – 2019. – № 2. – С. 185 –197. <https://doi.org/10.26583/npe.2019.2.16>
2. Павлюк А.О., Загуменнов В.С., Котляревский С.Г., Беспала Е.В. Термодинамическое моделирование равновесного состава продуктов реакции при обезвреживании технологического канала уран-графитового реактора // Теплоэнергетика. – 2018. – № 1. – С. 61 – 67. DOI: 10.1134/S0040363618010058
3. Куликова Т.В., Майорова А.В., Быков В.А., Шуняев К.Ю. Равновесный состав и термодинамические свойства ассоциированных расплавов системы Cu-In // Расплавы. – 2013. – № 5. – С. 51 – 58.
4. Пешкичев И.В., Макеева И.Р., Шульц О.В., Пугачев В.Ю., Дубосарский В.Г., Паукова А.Е., Кузнецова О.В., Дарина Л.Н., Бочкарева А.А. Программный комплекс TeDy для решения задач термодинамического моделирования // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Математическое моделирование и программирование. – 2018. – Т. 11. – № 1. – С. 84 – 94. DOI: 10.14529/mmp180108
5. Юманова И.Ф., Воеводина О.А. Определение химически равновесного состава продуктов сгорания органического топлива. // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. – 2013. – № 2 (58). – С. 154 –156.
6. Купцов В.И., Шихман Ю.М., Шлякотин В.Е. Универсальный программный комплекс процедур равновесного расчета состава и параметров многокомпонентных гомогенных и гетерогенных смесей // Авиационные двигатели. – 2019. – № 4 (5). – С. 31 – 36.
7. Белов Г.В., Трусов Б.Г. Термодинамическое моделирование химически реагирующих систем. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. – 96 с.
8. Синярев Г.В., Ватолин Н.А., Трусов Б.Г., Моисеев Г.К. Применение ЭВМ для термодинамических расчетов металлургических процессов – М.: Академический научно-издательский, производственно-полиграфический и книгораспространительский центр РАН "Издательство "Наука", 1982. – 260 с.
9. Белов Г.В. Термодинамическое моделирование: методы, алгоритмы, программы. – М.: Научный Мир, 2002. – 184 с.
10. Рыбенко И.А., Сеченов П.А. Инструментальная система расчета термодинамических функций индивидуальных веществ, химических реакций и сложной многокомпонентной гетерогенной системы // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. – 2022. – № 3 (41). – С. 18-27.
11. Сеченов П.А., Рыбенко И.А. База данных и программа для определения термодинамических свойств индивидуальных веществ // Информатика и системы управления. – 2022. – № 1 (71). – С. 17 – 26. DOI: 10.22250/18142400_2022_71_1_17
12. Сеченов П.А., Рыбенко И.А. Программа расчета термодинамических свойств химических реакций // Южно-Сибирский научный вестник. – 2022. – № 1 (41). – С. 60 – 64. DOI 10.25699/SSSB.2022.41.1.009
13. Игнатович В. Н. Парадокс Гиббса с точки зрения математика: Монография. – Киев: АТОПОЛ, 2010. – 80 с.
14. Макаркин В.М., Апайчева Л.А. Метод Лагранжа решения экстремальной задачи // Международный студенческий научный вестник. – 2016. – № 3-3. – С. 337 – 338.
15. Исмаилов Р.Т. Повышение эффективности использования резервов активной части основных производственных фондов в строительстве // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2017. – Т. 44. – № 1. – С. 186-195. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2017-44-1-186-195>
16. Шабалин Г.С., Паздерин А.В., Чусовитин П.В., Банных П.Ю., Тащилин В.А. Анализ статической устойчивости с использованием квадратичной целевой функции и обобщенного метода Ньютона // Материалы международной научно-технической конференции. – Иваново: ИГЭУ. – 2015. – С. 249 – 254.
17. Журтов А.В., Хежев Т.А., Хаджишалапов Г.Н., Карданов А.А., Шогенцуков М.А. Напряженно-деформированное состояние двухслойных армоцементных оболочек в условиях пожара // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2022. – Т. 49. – № 1. – С. 112-121. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2022-49-1-112-121>
18. Соколова М.А. Система линейных уравнений, основные понятия. Метод Гаусса // Аллея науки. – 2018. – Т. 6. – № 6 (22). – С. 297 –301.

References:

1. Barbin N.M., Sidash I.A., Terent'ev D.I., Alekseev S.G. Computer-simulated thermodynamic behavior of radionuclides U, Cl, Pu, Be, Ni, Am when radioactive graphite is heated in a carbon dioxide atmosphere. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2019; 2:185–197. (In Russ). <https://doi.org/10.26583/npe.2019.2.16>
2. Pavljuk A.O., Zagumenov V.S., Kotljarevskij S.G., Bepala E.V. Thermodynamic simulation of equilibrium composition of reaction products at dehydration of a technological channel in a uranium-graphite reactor. *Thermal Engineering*. 2018; 1: 61 – 67. (In Russ). DOI: 10.1134/S0040363618010058
3. Kulikova T.V., Majorova A.V., Bykov V.A., Shunjaev K.Ju. Equilibrium composition and thermodynamic properties of associated melts of the system Cu-In. *Melts*. 2013; 5:51 – 58. (In Russ).
4. Peshkichev I.V., Makeeva I.R., Shul'c O.V., Pugachev V.Ju., Dubosarskij V.G., Paukova A.E., Kuznecova O.V., Darina L.N., Bochkareva A.A. Software TeDy for thermodynamical modelling. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mathematical Modelling, Programming & Computer Software* (Bulletin SUSU MMCS), 2018; 11(1): 84-94. (In Russ). DOI: 10.14529/mmp180108
5. Jumanova I.F., Voevodina O.A. Definition of chemical equilibrium composition of fossil fuel combustion products. *Bulletin of*

- IzhSTU named after M.T. Kalashnikov. 2013; 2 (58): 154 –156. (In Russ).
6. Kupcov V.I., Shihman Ju.M., Shljakotin V.E. The universal procedures code for equilibrium calculation of the composition and parameters of the multi-component homogeneous and heterogeneous mixtures. *Aircraft engines*. 2019; 4 (5):. 31 – 36. (In Russ).
 7. Belov G.V., Trusov B.G. Thermodynamic modeling of chemically reacting systems. Moscow: Bauman MSTU Publ., 2013; 96. (In Russ).
 8. Sinjarev G.V., Vatolin N.A., Trusov B.G., Moiseev G.K. Computer application for thermodynamic calculations of metallurgical processes. Moscow: Academic Scientific Publishing, Production, Printing and Book Distribution Center of the Russian Academy of Sciences "Nauka Publishing House", 1982; 260. (In Russ).
 9. Belov G.V. Thermodynamic modeling: methods, algorithms, programs. Moscow: Scientific World, 2002; 184. (In Russ).
 10. Rybenko I.A., Sechenov P.A. Instrumental system for calculating thermodynamic functions of individual substances, chemical reactions and a complex multi-component heterogeneous system. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2022; 3 (41): 18 – 27. (In Russ.).
 11. Sechenov P.A., Rybenko I.A. Database and program for determining thermodynamic properties of individual substances. *Informatika i sistemy upravleniya*. 2022; 1(71): 17-26. (In Russ.). DOI: 10.22250/18142400_2022_71_1_17
 12. Sechenov P.A., Rybenko I.A. Program for calculating the thermodynamic properties of chemical reactions. *South-Siberian Scientific Bulletin*. 2022; 1 (41):60 – 64. (In Russ.). DOI 10.25699/SSSB.2022.41.1.009
 13. Ignatovich V. N. Gibbs' paradox from the point of view of a mathematician; Monograph. Kiev: ATOPOL, 2010; 80 .
 14. Makarkin V.M., Apajcheva L.A. Lagrange method for solving an extreme problem. *International Student Scientific Bulletin*. 2016; 3(3): 337 – 338. (In Russ).
 15. Ismailov R.T. Improving reserve use efficiency of the active portion of main production funds in construction. *Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences*. 2017;44(1):186-195. (In Russ.) <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2017-44-1-186-195>
 16. Shabalin G.S., Pazderin A.V., Chusovitin P.V., Bannyh P.Ju., Tashhilin V.A. Static stability analysis using quadratic objective function and generalized Newton's method. Materials of the international scientific and technical conference. Ivanovo: IGEU, 2015; 249 – 254. (In Russ).
 17. Zhurtov A.V., Khezhev T.A., Khadzhishalapov G.N., Kardanov A.A., Shogentsukov M.A. Stress strain state of double-layered ferrocement shells under the fire condition. *Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences*. 2022;49(1):112-121. (In Russ.) <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2022-49-1-112-121>
 18. Sokolova M.A. System of linear equations, basic concepts. The Gauss method. *Alley of Science*. 2018; 6(22): 297 –301. (In Russ).

Сведения об авторах:

Сеченов Павел Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры прикладных информационных технологий и программирования; pavesa89@mail.ru; ORCID.0000-0003-4551-3822

Рыбенко Инна Анатольевна, доктор технических наук, доцент, профессор, заведующая кафедрой прикладных информационных технологий и программирования; rybenkoi@mail.ru; ORCID.0000-0003-1679-0839

Information about the authors:

Pavel A. Sechenov, Cand.Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Department of Applied Information Technologies and Programming; pavesa89@mail.ru; ORCID.0000-0003-4551-3822

Inna A. Rybenko, Dr. Sci., (Eng.), Assoc. Prof., Prof., Head of the Department of Applied Information Technologies and Programming; pavesa89@mail.ru; ORCID.0000-0003-4551-3822

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/ Received 15.10.2022.

Одобрена после рецензирования / Revised 02.11.2022.

Принята в печать /Accepted for publication 02.11.2022.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 004.056

DOI: 10.21822/2073-6185-2022-49-4-113-125

Оригинальная статья /Original Paper

Метод стеганодетектирования скрытых изображений для систем защиты объектов интеллектуальной собственности

Ф.Б. Тебueva, М.Г. Огур, И.В. Мандрица, А.Б. Чернышев, Г.И. Линец, В.П. Мочалов
Северо-Кавказский федеральный университет,
355017, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является повышение качества обнаружения и стеганодетектирования скрытых изображений, внедряемых в защищаемый объект интеллектуальной собственности различными методами. **Метод.** Предлагается метод стеганодетектирования скрытых изображений на основе глубокого обучения. Метод основан на использовании модели сверточной нейронной сети VGG16, в которой произведена оптимизация архитектуры и параметров обучения. **Результат.** Повышение точности обнаружения изображений-стегоконтейнеров на 3,8 %, а также возможность использования алгоритма разработанного метода для изображений, имеющих большее разрешение, чем размерность входа искусственной нейронной сети. **Вывод.** Разработанный метод предназначен для проведения стеганодетектирования в двух случаях: для выявления факта незаконного использования объектов интеллектуальной собственности; для применения в компьютерной криминалистике при идентификации изображений, содержащих скрытую и запрещенную к распространению информацию.

Ключевые слова: стеганодетектирование скрытых изображений, глубокое обучение, искусственная нейронная сеть

Для цитирования: Ф.Б. Тебueva, М.Г. Огур, И.В. Мандрица, А.Б. Чернышев, Г.И. Линец, В.П. Мочалов. Метод стеганодетектирования скрытых изображений для систем защиты объектов интеллектуальной собственности. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022; 49(4):113-125. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-4-113-125

Stegan detection method for latent images for intellectual property protection systems
F.B. Tebueva, M.G. Ogur, I.V. Mandritsa, A.B. Chernyshev, G.I. Linets, V.P. Mochalov
North-Caucasus Federal University,
1 Pushkina Str., Stavropol 355017, Russia

Abstract. Objective. Improving the quality of detection and stego-detection of latent images embedded in the protected object of intellectual property by various methods. **Method.** The method for stego-detection of latent images based on deep learning is proposed. The method is based on the use of the VGG16 convolutional neural network model, in which the architecture and training parameters are optimized. **Result.** Increasing the accuracy of detecting stegocontainer images by 3.8%, as well as the possibility of using the algorithm of the developed method for images with a higher resolution than the dimension of the input of an artificial neural network. **Conclusion.** The developed method is intended for stegan detection in two cases: to detect the fact of illegal use of intellectual property objects; for use in computer forensics when identifying images containing hidden and prohibited information.

Keywords: hidden image stegan detection, deep learning, artificial neural network

For citation: F.B. Tebueva, M.G. Ogur, I.V. Mandritsa, A.B. Chernyshev, G.I. Linets, V.P. Mochalov. Stegan detection method for latent images for intellectual property protection systems. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science. 2022; 49(4):113-125. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-4-113-125

Введение. В цифровом мире стеганодетектирование изображений и видео по-прежнему является относительно новой областью цифровых технологий и представляет собой раздел

компьютерной криминалистики. Каждый день пользователь сталкивается с огромным количеством изображений и видео, и среди них могут быть и те, в которые встроены секретные данные для проведения киберпреступлений.

Для оценки современного состояния научно-технического прогресса в области стегано-детектирования цифровых изображений и медиафайлов в настоящей статье проведено исследование научных публикаций по существующим методам. Так, в статье [1] представлен обзор и анализ различных существующих методов стеганографии, а также некоторые общие стандарты и рекомендации, взятые из литературы.

В статье [2] представлен обзор стеганографии и стеганодетектирования цифровых изображений, в основном охватывающий фундаментальные концепции, прогресс в области стеганографических методов для изображений в формате JPEG, а также вопросы разработки соответствующих стеганалитических схем. Приведены вопросы повышения эффективности стеганографических методов и возможности улучшения технологий стеганодетектирования. В статье [3] исследуется состояние стеганографии и стеганодетектирования с точки зрения текущих тенденций. Приведены современные методы стеганографии и стеганодетекции (изображения и видео), которые встречаются в литературе последних лет. Так же анализируется набор данных и инструменты, доступные для мультимедийной стеганографии и стеганодетектирования, с примерами практического использования.

Самый простым методом стеганографии является встраивание сообщения после конца файла (end of file, EOF), либо помещение скрытой информации в заголовок EXIF, содержащий дополнительные сведения об изображении. Оба метода просты и быстры, но уязвимы для стеганодетектирования. Даже при обычном просмотре файла с помощью шестнадцатеричного редактора, сообщение, если оно не зашифровано, может быть обнаружено. Однако, поскольку такие сообщения легко могут быть обнаружены, были разработаны как новые методы стеганографии, рассмотренные ранее в данной работе, так и новые методы стеганодетектирования, направленные на противодействие им.

В зависимости от метода атаки, который использует стеганалитика, можно выделить шесть основных категорий методов стеганодетектирования:

- визуальное стеганодетектирование;
- сигнатурное стеганодетектирование;
- статистическое стеганодетектирование;
- стеганодетектирование методом расширения спектра;
- стеганодетектирование в области преобразований;
- универсальное стеганодетектирование.

Рассмотрим более подробно каждую из групп.

Визуальное стеганодетектирование является одним из простейших способов стеганодетектирования. Визуальная атака на стегоконтейнер состоит в изучении подозрительного изображения невооруженным глазом для выявления любых заметных искажений. На практике такая задача оказывается очень трудной, поскольку изменения, внесенные в изображение при встраивании сообщения, как правило, не приводят к заметному ухудшению качества. Большинство стеганографических алгоритмов создают на выходе объект, слабо отличающийся от исходного пустого стегоконтейнера. Однако при удалении неизменных частей стегоизображения можно наблюдать признаки манипуляции. Следовательно, если аналитик может идентифицировать те особенности изображения, которые характеризуют его как заполненный стегоконтейнер, визуальная атака может выявить существование скрытого сообщения.

Наиболее распространенной формой визуального стеганодетектирования является анализ наименьшего значащего бита (НЗБ). Изображение преобразуется в двоичную форму, после чего из него извлекаются младшие биты цветовых каналов. В цветовых каналах изображений обычно содержится одинаковое количество четных и нечетных значений. Иначе говоря, единиц в младших битах должно быть примерно столько же, сколько нулей. Однако при преобразова-

нии текста в двоичный формат данное статистическое свойство может нарушаться. Это вызывает визуальную несогласованность и помогает аналитику классифицировать изображение как заполненный стегоконтейнер. Однако данный метод успешен только тогда, когда для формирования стегоизображения использовался «плохой» стеганографический алгоритм.

Типичными программными средствами, использующими подход НЗБ, являются Camouflage и JpegX [4, 5] – ранние стеганографические программы, которые в настоящее время устарели и используются реже из-за простоты их обнаружения [6]. Их «плохой» алгоритм помещает биты сообщения в младшие биты цветовых каналов без какой-либо предварительной обработки. Менее вероятна ситуация, когда имеется доступ к исходным изображениям (пустым стегоконтейнерам). Тогда изображения с подозрением на наличие стегопосылки сравниваются с соответствующими исходными изображениями.

Еще одним признаком существования скрытых сообщений могут являться пустые места в изображениях. Их наличие может быть связано с тем, что некоторые стеганографические алгоритмы обрезают или дополняют изображение так, чтобы оно соответствовало фиксированному размеру. Различия в размере файла между пустым контейнером и изображением со стегопосылкой, увеличение или уменьшение числа уникальных цветов в изображениях также могут быть использованы в качестве индикаторов скрытых сообщений.

Метод определения стеганографического содержания в изображениях JPEG независимо от сигнатуры инструмента предложен в работах [7, 8]. Данный метод заключается в том, что изображение делится на блоки 8×8 пикселей, после чего для каждого блока путем анализа значений коэффициентов дискретного косинусного преобразования определяется матрица квантования. Затем матрица квантования сравнивается на предмет совместимости со стандартной матрицей квантования JPEG. Если есть несовместимые блоки, изображение характеризуется как заполненный стегоконтейнер.

Статистическое стеганодетектирование основано на использовании подходов, разработанных в результате исследования влияния встраивания данных на статистические характеристики сообщения, такие как коэффициенты корреляции, энтропия, параметры распределений, вероятности появления элементов и т.д.

Для достижения максимальной точности стеганодетектирования необходимо глубокое понимание процесса встраивания скрытого сообщения. Стеганографические алгоритмы, работающие в пространственной области, применяются непосредственно к пикселям изображения.

Такие алгоритмы делятся на две основные категории: замена НЗБ и сопоставление НЗБ. При замене НЗБ наименее значимые биты байтов изображения-контейнера заменяются секретными данными. В алгоритмах замены НЗБ существуют две схемы встраивания: последовательная и рандомизированная. Последовательное встраивание означает, что алгоритм начинает работу с первого пикселя изображения-контейнера и внедряет биты данных сообщения по порядку, пока не будет встроено все сообщение. При рандомизированном встраивании пиксели для встраивания выбираются по некоторой более сложной схеме.

Рассмотрим методы стеганодетектирования, направленные на выявление встраивания скрытых сообщений методом замены LSB. Вестфельд и Пфицманн [9] предложили первый метод статистического стеганодетектирования. Этот метод обнаруживает пары значений, измененных в результате встраивания сообщения. Причем пары содержат элементы, отличающиеся младшим битом. Они могут быть значениями яркости, коэффициентами дискретного косинусного преобразования (ДКП) или индексами палитры. Вестфельд и Пфицманн утверждают, что частоты появления каждого отдельного значения из каждой такой пары имеют тенденцию значительно отличаться от среднего значения их частот появления. Таким образом, с помощью критерия хи-квадрат можно обнаружить несоответствие реального распределения теоретическому, и, следовательно, выявить факт внедрения скрытой информации. Метод хи-квадрат надежно обнаруживает последовательно встраиваемые сообщения, но малоэффективен при рандомизированном встраивании. Для такого типа встраивания существует более общая реали-

зация атаки хи-квадрат [10, 11]. Для решения задач статистического стеганодетектирования активно используются подходы, основанные на машинном обучении. Так, в работе [12] для классификации изображений-контейнеров на пустые и заполненные используются деревья решений и ИНС. Авторы статьи [13] использовали для выявления факта внедрения скрытого сообщения авторегрессионную модель и классификатор, основанный на методе опорных векторов (SVM), а также несколько параметров регрессии для прогнозирования длины скрытой информации. Фридрих и др. [14] предложили детектор на основе машинного обучения, использующий в качестве признаков факты одновременное появление соседних шумовых остатков.

В статье [15] предложены две альтернативные схемы стеганодетектирования для стеганографии с расширенным спектром. Первая схема использует методы регрессии для оценки изображения-контейнера и стегоизображения. Для обнаружения секретного сообщения оценочное значение вычитается из стегоизображения. Вторая схема использует статистические методы более высокого порядка. Эксперименты показали, что в сравнении с первой предложенной схемой использование статистики более высокого порядка позволило повысить результативность стеганодетектирования.

Универсальное стеганодетектирование направлено на обнаружение скрытых сообщений вне зависимости от того, какой стеганографический метод был применен к изображению. Основная трудность разработки таких методов состоит в поиске общих черт, характерных для стегоизображений. В рамках данного подхода наибольшее применение находят методы машинного обучения.

В работе [16] в целях построения статистических характеристик высокого порядка для естественных изображений применяется вейвлет-разложение. Для различения нетронутых и измененных изображений используется линейный дискриминантный анализ Фишера. По результатам экспериментов, точность метода варьируется от 1,3% до 94% в зависимости от стеганографического алгоритма и длины сообщения (от 32×32 до 256×256). Данная работа демонстрирует сложность создания метода, показывающего высокую эффективность при противодействии широкому классу стеганографических методов.

Авторы работы [17] также использовали вейвлет-подобную декомпозицию для построения статистических моделей естественных изображений. Для различения пустых и заполненных изображений-контейнеров в работе использован метод опорных векторов. В [18] теми же исследователями предложено расширение модели для цветных изображений. Для упрощения процесса обучения классификатора был использован одноклассовый метод опорных векторов.

В работе [19] представлен метод стеганодетектирования для противодействия последовательной стеганографии. Для оценки положения и длины сообщения используются резкие изменения в статистических характеристиках изображения. Эти изменения являются характерной особенностью, которая отличает последовательную стеганографию от других типов.

В исследовании [20] предложено стеганодетектирование на основе сверточных нейронных сетей. Предлагаемая сеть имеет структуру, отличную от искусственной нейронной сети, разработанной для задач компьютерного зрения. Вместо случайной инициализации веса в первом слое сети инициализируются базовым набором высокочастотных фильтров, используемым при вычислении остаточных карт. Кроме того, в модели используется новая функция активации, называемая усеченным линейным блоком. Производительность стеганодетектирования была повышена за счет включения информации о канале выбора. Этот подход оказался способным с высокой точностью обнаруживать несколько современных стеганографических схем в пространственной области для широкого диапазона размеров полезных нагрузок (0,05-0,5 бит на пиксель).

Постановка задачи. Учитывая результаты проведенного обзора существующих методов стеганодетектирования, можно сделать вывод, что в качестве основы разрабатываемого метода следует использовать технологии глубокого обучения искусственной нейронной сети (ИНС), поскольку в настоящее время они позволяют добиться наибольшей универсальности в распо-

знавании стегоконтейнеров, заполненных с применением различных стеганографических алгоритмов. Однако разработка ИНС сопряжена с рядом сложностей. В частности, выбор архитектуры ИНС для решения конкретной задачи значительно влияет на эффективность полученного решения. Например, одиночный нейрон способен воспринимать и воспроизводить прямую в мерном пространстве.

Более сложные сети могут описывать более сложные структуры, но проблема состоит в том, чтобы определить, какая сеть наиболее точно и полно соответствует структуре задачи. Целью разработчика ИНС является создание сети, достаточно сложной для обработки требуемых данных, но достаточно маленькой, чтобы избежать переобучения.

ИНС могут быть обучены численному решению задач, но ошибочный выбор размера и структуры сети способен привести к значительной потере эффективности. В частности, сеть, имеющая слишком малый размер по количеству нейронов или количеству скрытых слоев, будет иметь тенденцию изучать наиболее грубые взаимосвязи в обучающих данных и игнорировать более тонкие детали, что является критичным с точки зрения стеганодетектирования. Однако слишком большая сеть будет иметь тенденцию чрезмерно специализироваться и слишком хорошо «запоминать» обучающую выборку, и, как следствие, иметь плохие обобщающие способности.

Основная задача стеганодетектирования изображений состоит в определении факта наличия или отсутствия в некотором входном изображении скрытого сообщения. По своей сути данная задача является задачей бинарной классификации, т.к. предполагает отнесение объекта к одному из двух классов. Наибольшую эффективность в решении подобных задач в настоящее время демонстрируют сверточные нейронные сети.

Методы исследования. В качестве основы предлагаемого метода стеганодетектирования используется ИНС с архитектурой VGG-16 (рис. 1), которая была изначально разработана для классификации изображений, однако хорошо себя зарекомендовала и в ряде других областей, связанных с обработкой изображений.

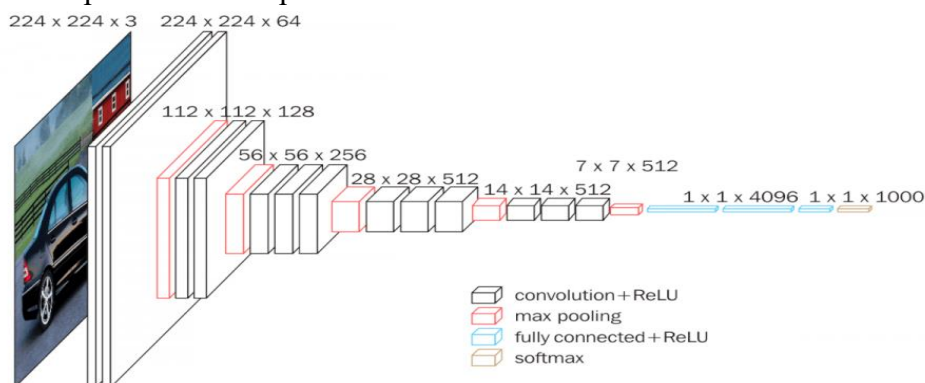


Рис.1. Структура оригинальной ИНС VGG-16

Fig.1. Structure of the original ANN VGG-16

Для решения задач стеганодетектирования в архитектуру ИНС внесены изменения:

- размер входного изображения изменён на 256x256;
- во всех сверточных блоках, начиная со второго, применяется пространственное исключение (spatial dropout) с вероятностью 0,1;
- функция активации в сверточных блоках изменена с ReLU на Leaky ReLU;
- в сверточных блоках после применения функции активации добавлен слой получения абсолютного значения (ABS);
- после слоя ABS в сверточные блоки добавлен слой пакетной нормализации (batch normalization, BN);
- полносвязная часть сети заменена на структуру, изображённую на рис. 2,а;
- в качестве оптимизатора использован стохастический градиентный спуск (SGD).

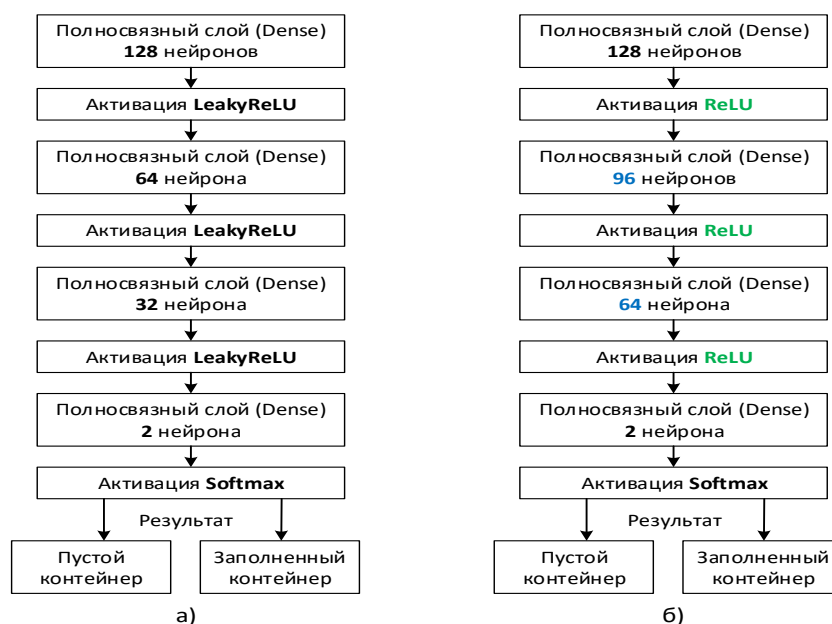


Рис.2. Исходная (а) и модифицированная (б) структура полносвязной части ИНС для проведения стеганодетектирования
Fig.2. Initial (a) and modified (b) structure of the full-link part of the ANN for steganodetection

В рамках предлагаемого метода стеганодетектирования структура полносвязной части сети заменена структурой, изображенной на рис. 2,б: функция активации заменена на ReLU, во втором и третьем полносвязных слоях количество нейронов увеличено с 64 до 96 и с 32 до 64 соответственно. Обучение ИНС предлагается выполнить с использованием языка программирования Python 3.8 и библиотеки TensorFlow версии 2.2.

В качестве обучающей выборки использованы изображения из библиотек BOSSBase и BOWS 2, в общей сложности 20 тысяч пар изображений. Все изображения приведены к размеру 256x256 пикселей, после чего в них внедрены стеганографические нагрузки с помощью алгоритма S-UNIWARD с плотностью упаковки 0,4 бит/пиксель. 14000 пар изображений использованы для обучения, 1000 пар для валидации, 5000 пар для тестирования. Гиперпараметры обучения, использованные в оригинальном и предлагаемом методе, представлены в табл. 1.

Таблица 1. Гиперпараметры обучения ИНС
Table 1. Hyperparameters of ANN training

Гиперпараметр Hyperparameter	Метод-аналог Analogue method	Предлагаемый метод Proposed method
Инициализатор свёрточных и полносвязных слоёв Initializer for Convolutional and Fully Connected Layers	Glorot Normal	
Вероятность пространственного исключения (spatial dropout)	0,1	
Оптимизатор Optimizer	SGD с моментом 0,95	
Коэффициент скорости обучения (learning rate)	0,005	0,003
Размер пакета (batch size)	64	32

Графики обучения ИНС в соответствии с методом-аналогом и предлагаемым методом представлены на рис. 3 и 4.

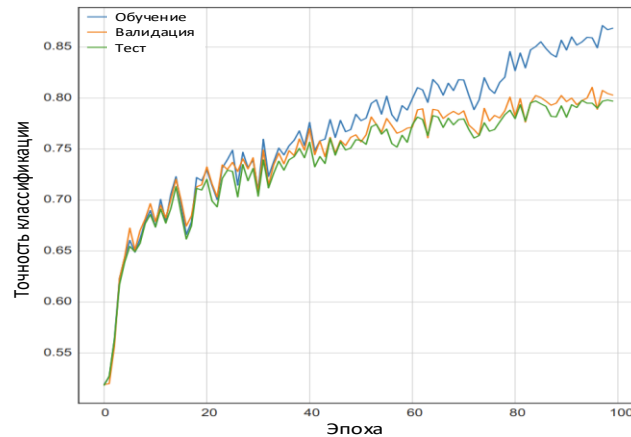


Рис.3. Точность классификации в зависимости от эпохи обучения для метода-аналога
Fig.3. Classification accuracy as a function of training epoch for the analogue method

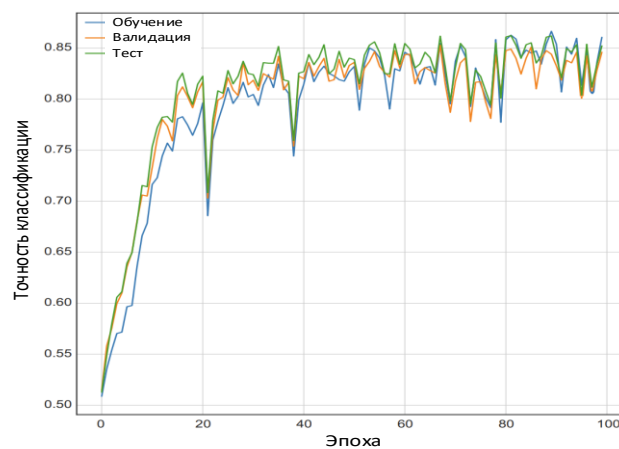


Рис.4. Точность классификации в зависимости от эпохи обучения для предлагаемого метода
Fig.4. Classification accuracy as a function of the epoch of learning for the proposed method

Итоговая точность классификации изображений на предмет наличия встроенного сообщения методом-аналогом составила 0,812. Точность классификации, достигаемая предлагаемым методом, составила 0,843. При этом в случае метода-аналога на последних эпохах наблюдаются признаки начала переобучения.

В качестве метрики точности распознавания стегоконтейнеров предлагается использовать метрику BinaryAccuracy, вычисляемую по правилу:

$$BinaryAccuracy = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \begin{cases} 1, & \text{если } a'_i = a_i \wedge b' = b_i \\ 0 & \text{в противном случае} \end{cases}, \quad (1)$$

где N – число изображений в выборке;

a_i – величина, равная единице, если i -е изображение является пустым контейнером, и нулю в противном случае;

b_i – величина, равная единице, если i -е изображение является заполненным стегоконтейнером, и нулю в противном случае;

a'_i – величина, равная единице, если первый выход ИНС принимает значение больше порогового при подаче на вход ИНС i -го изображения, и нулю в противном случае;

b'_i – величина, равная единице, если второй выход ИНС принимает значение больше порогового при подаче на вход ИНС i -го изображения, и нулю в противном случае. Величина порогового значения составляла 0,5.

В результате внесения изменений в структуру полносвязной части ИНС, а также изменения параметров обучения удалось добиться повышения точности обнаружения изображений-стегоконтейнеров на 3,8 %. Стоит отметить, что в настоящее время отсутствуют универсальные

методики определения структуры ИНС и гиперпараметров обучения, которые были бы оптимальными для решения задач определённого класса. Их выбор во многом зависит от интуиции разработчика и производится эмпирически. Таким образом, возможно дальнейшее совершенствование предложенного метода за счёт оптимизации структуры ИНС и модификации процесса обучения.

Обсуждение результатов. Основным недостатком предлагаемого подхода к стеганодетектированию изображений в его текущем виде является фиксированный размер входного изображения (в данном случае – 256x256 точек). В общем случае изображение-стегоконтейнер может иметь произвольное разрешение, в т.ч. с иным соотношением сторон. Предварительное масштабирование изображения до необходимого размера не является оптимальным подходом, поскольку по своей сути является разрушающим воздействием по отношению к скрытому сообщению. Если входное изображение имеет по крайней мере по одной из сторон большее количество пикселей, чем размерность входа ИНС, уменьшение размера изображения приведёт к потере информации и ухудшит качество детектирования. Если изображение имеет меньшие размеры, то увеличение изображения до размерности входа также может привести к непредсказуемым результатам ввиду применения интерполяции.

Для адаптации метода стеганодетектирования к изображениям произвольного размера может быть использовано разбиение входного изображения на сегменты, имеющие размер, соответствующий размерности входа ИНС. Если изображение имеет разрешение, не кратное размеру входного блока, предлагается произвести двух- или четырёхкратное разбиение изображения с различным положением начального блока (рис. 5).

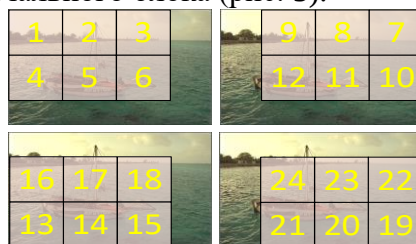


Рис.5. Пример разбиения изображения произвольного размера на блоки фиксированного размера

Fig.5. Example of splitting an arbitrary-sized image into fixed-sized blocks

Хотя такой подход приводит к увеличению вычислительной нагрузки, он позволяет избежать применения каких-либо механизмов выравнивания (дополнение нулями, дополнение другим фрагментом изображения и т.п.), результатом работы которых могут быть нетипичные для обученной ИНС входные данные.

В результате применения такого подхода для каждого блока изображения ИНС формирует метрики его принадлежности к одному из двух классов. Решение о наличии скрытого сообщения в изображении принимается следующим образом: если по крайней мере для одного блока изображения значение на втором выходе ИНС превышает некоторый порог разграничения $p_{min} \in (0; 1)$, данное изображение классифицируется как стегоконтейнер.

Значение величины p_{min} следует выбрать таким образом, чтобы минимизировать количество ошибок первого и второго рода.

Под ошибкой первого рода понимается определение пустого контейнера как изображения со скрытым сообщением. Ошибка второго рода – определение заполненного стегоконтейнера как изображения, не содержащего скрытых сообщений. Определение значения p_{min} проведено экспериментально. Для проведения эксперимента с сайта unsplash.com взяты 2000 изображений. В половину из них внедрены скрытые сообщения с использованием алгоритма S-UNIWARD с плотностью упаковки 0,4 бит/пиксель, после чего проведено их распознавание с помощью предложенного метода при различных значениях p_{min} . Для каждого значения p_{min} измерено количество ошибок первого и второго рода, а также общее число ошибок (рис. 6).

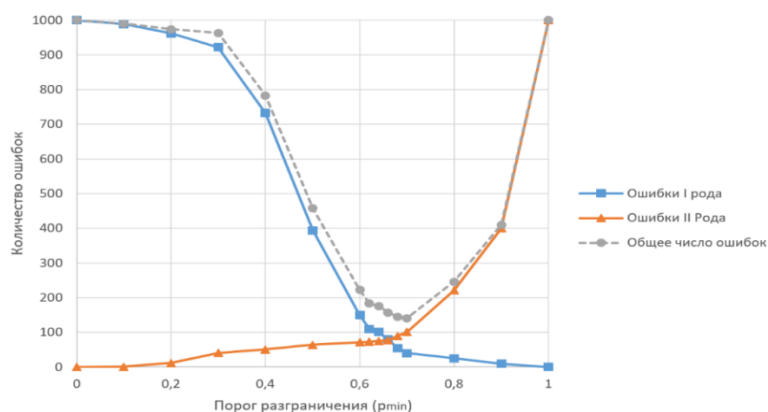


Рис.6. Зависимость количества ошибок распознавания стегоконтейнеров от порога разграничения
Fig.6. Dependence of the number of recognition errors of stegocontainers on the delimitation threshold

Исходя из результатов эксперимента, наилучшие результаты достигаются при p_{min} в интервале $[0,6; 0,7]$. Наименьший общий процент ошибок (14,1 %) достигается при значении $p_{min} = 0,7$, однако данное значение может быть неоптимальным, если принять, что ошибки первого и второго рода имеют различный вес. Поскольку использованная в рамках экспериментов ИНС обучена с применением лишь одного типа стеганографического алгоритма (S-UNIWARD), она в текущем виде не рассчитана на практическое применение для обнаружения широкого класса стегоконтейнеров.

Однако результаты экспериментов со стегоконтейнерами, полученными в результате простой замены наименьших значащих бит изображения псевдослучайной последовательностью, демонстрируют уровень обнаружения порядка 82%, хотя в обучающей выборке отсутствовали изображения подобного типа. Этот факт является дополнительным подтверждением эффективности использованного подхода. Общая схема метода обнаружения стегоконтейнера в соответствии с предложенным методом представлена на рис. 7.

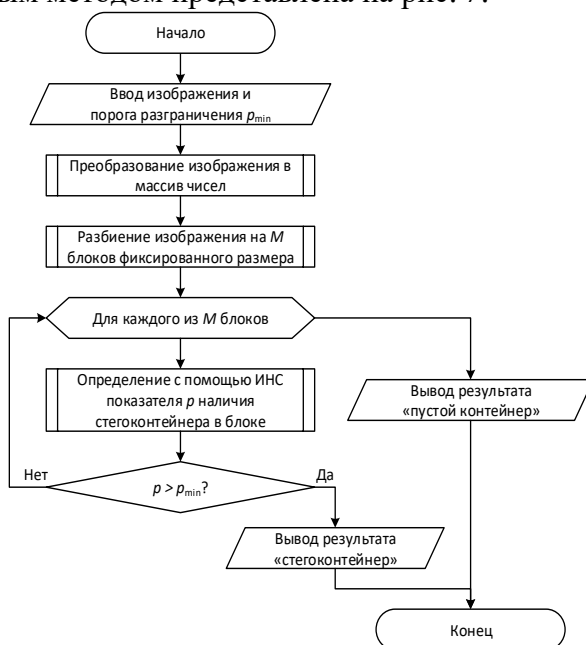


Рис.7. Общая схема метода обнаружения изображений-стегоконтейнеров с использованием разработанного метода

Fig.7. General scheme of the image-stacker detection method using the developed method

Процесс анализа блоков происходит до появления первого блока, для которого оценка принадлежности к множеству «стегоконтейнер», выработанная с помощью ИНС, окажется выше установленного порога p_{min} . Такой подход позволяет сократить время стеганодетектирования, если аналитику не требуется информация о каждом блоке для дополнительной ручной

проверки либо сбора статистики.

Таким образом, предложенный метод стеганодетектирования, основанный на применении ИНС, позволил повысить точность обнаружения изображений-стегоконтейнеров на 3,8 %, а также использовать алгоритм для изображений, имеющих большее разрешение, чем размерность входа ИНС. Результат достигнут за счёт оптимизации архитектуры ИНС и параметров обучения, а также разбиения входного изображения на блоки.

Для реализации программного модуля, осуществляющего стеганодетектирование изображений с помощью предложенного алгоритма, использована среда разработки Microsoft Visual Studio 2019, язык программирования C#. Графический интерфейс разработанного модуля представлен на рис. 8.

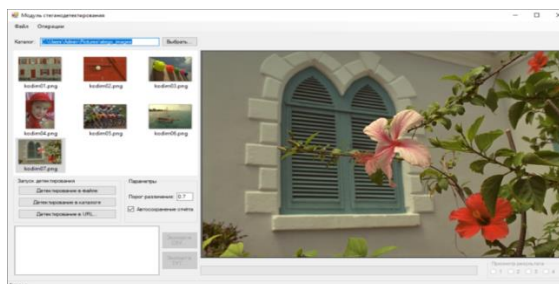


Рис.8. Пользовательский интерфейс разработанного программного модуля

Fig.8. User interface of the developed program module

К функциональным возможностям модуля относятся:

- стеганодетектирование изображений, загруженных из файла;
- стеганодетектирование изображений в выбранном каталоге;
- выгрузка изображений с веб-страниц с последующим проведением стеганодетектирования;
- формирование и вывод сведений об отдельных блоках изображения (рис. 9);
- формирование отчетов в текстовом и табличном (CSV) форматах;
- регулировка порога различения стегоконтейнеров;
- поддержка изображений форматов PNG, BMP, JPEG, GIF.

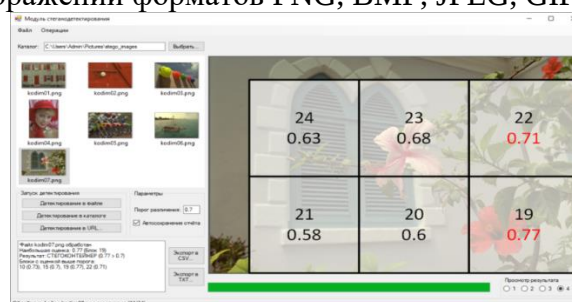


Рис.9. Просмотр результатов стеганодетектирования

Fig.9. Viewing steganodetection results

Разработанное приложение состоит из следующих модулей (рис. 10):

- модуль графического интерфейса пользователя;
- модуль загрузки изображений из файловой системы (ФС);
- модуль загрузки изображений с интернет-сайтов;
- модуль интеграции с ИНС;
- ИНС для стеганодетектирования;
- модуль формирования графических отчетов;
- модуль формирования табличных и текстовых отчетов.

Модуль графического интерфейса реализует взаимодействие с пользователем, осуществляет управление остальными модулями, а также визуализирует результаты стеганодетектирования.

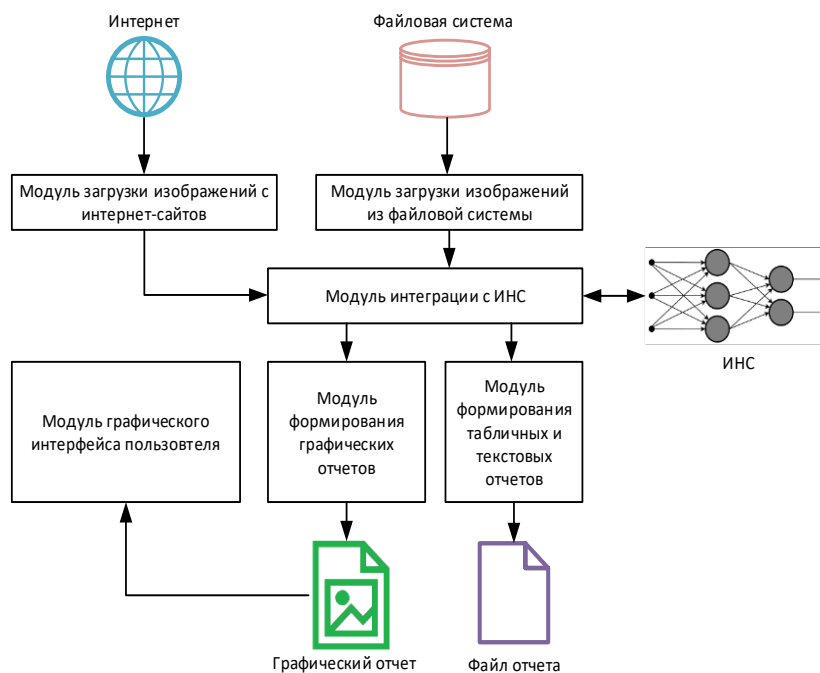


Рис.10. Схема обмена данными между модулями приложения при проведении стеганодетектирования изображений
Fig.10. Scheme of data exchange between application modules when performing image steganodetection

Модули загрузки изображений из ФС и с интернет-сайтов производят загрузку изображений в оперативную память, после чего передают их модулю интеграции с ИНС. Данный модуль выполняет преобразование фалов изображений в числовые массивы, производит формирование блоков и подает их на вход ИНС, результат работы которой сохраняет в виде массива в оперативной памяти.

В зависимости от настроек приложения, массив результатов передаётся модулям формирования графических, текстовых и табличных отчетов. Использование модульной структуры позволяет упростить разработку и дальнейшую модернизацию приложения.

Вывод. Разработанный метод предназначен для проведения стеганодетектирования в двух случаях: для выявления факта незаконного использования объектов интеллектуальной собственности: для применения в компьютерной криминалистике при идентификации изображений, содержащих скрытую и запрещенную к распространению информацию.

Входными данными при программной реализации разработанного метода являются файловый каталог или URL электронного ресурса, содержащий набор изображений, в которых требуется найти следы наличия скрытой информации.

В случае 1 входными данными будут являться источники, которые используют объекты интеллектуальной собственности: товарные знаки и промышленные образцы с нарушениями прав интеллектуальной собственности. Такими источниками могут быть недобросовестные конкуренты, пытающиеся очернить репутацию бренда, производители контрафактного контента и изделий.

В случае 2 входными данными могут являться изображения, взятые из аккаунта подозреваемого в незаконной торговле наркотиками или терроризме, которых могут содержаться стеганоконтейнеры содержащие информацию о его не законной деятельности. Например, скрытые указания, координирующая преступную группировку информация, места закладок с наркотиками и подобная информация. Выходными данными является список файлов, содержащих скрытую информацию, когда нужно определить наличие подозрительных графических файлов.

Библиографический список:

1. National Natural Science Foundation of China [Электронный ресурс]. URL: http://www.nsf.gov.cn/english/site_1/index.html (дата обращения: 19.06.2021).
2. Ministry of Science and Technology of the People's Republic of China [Электронный ресурс]. URL: <http://en.most.gov.cn/> (дата обращения: 19.05.2021).
3. Chinese Academy of Sciences [Электронный ресурс]. URL: <https://english.cas.cn/> (дата обращения: 19.05.2021).
4. Cheddad A. и др. Digital image steganography: Survey and analysis of current methods // *Signal Processing*. 2010. Т. 90, № 3. С. 727-752.
5. Li B. и др. A Survey on Image Steganography and Steganalysis // *Journal of Information Hiding and Multimedia Signal Processing* c. 2011. Т. 2, № 2.
6. Dalal M., Juneja M. Steganography and Steganalysis (in digital forensics): a Cybersecurity guide // *Multimed. Tools Appl.* Springer, 2021. Т. 80, № 4. С. 5723-5771.
7. Breaking a steganography software: Camouflage [Электронный ресурс]. URL: <http://www.guillermi2.net/stegano/camouflage/index.html> (дата обращения: 20.05.2021).
8. Breaking a steganography software: JpegX [Electronic resource]. URL: <http://www.guillermi2.net/stegano/jpegx/index.html> (дата обращения: 20.05.2021).
9. Analyzing steganography softwares [Электронный ресурс]. URL: <http://www.guillermi2.net/stegano/> (дата обращения: 20.05.2021).
10. Fridrich J., Goljan M. Practical steganalysis of digital images: state of the art // *Security and Watermarking of Multimedia Contents IV. SPIE*, 2002. Т. 4675. С. 1-13.
11. Kodovský J., Fridrich J. JPEG-compatibility steganalysis using block-histogram of recompression artifacts // *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2013. Т. 7692 LNCS. С. 78-93.
12. Chandramouli R., Kharrazi M., Memon N. Image steganography and steganalysis: Concepts and practice // *Lect. Notes Comput. Sci. (including Subser. Lect. Notes Artif. Intell. Lect. Notes Bioinformatics)*. Springer Verlag, 2004. Т. 2939. С. 35-49.
13. Fridrich J., Du R., Long M. Steganalysis of LSB encoding in color images // *IEEE International Conference on Multi-Media and Expo. 2000. № III/WEDNESDAY*. С. 1279-1282.
14. Fridrich J., Goljan M., Du R. Reliable detection of LSB steganography in color and grayscale images // *Proceedings of the ACM International Multimedia Conference and Exhibition. Association for Computing Machinery (ACM)*, 2001. №II. С. 27-30.
15. Lerch-Hostalot D., Megías D. Unsupervised steganalysis based on artificial training sets // *Eng. Appl. Artif. Intell.* Elsevier Ltd, 2016. Т. 50. С. 45-59.
16. Shi Y.Q., Chen C., Chen W. A Markov process based approach to effective attacking JPEG steganography // *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*. Springer Verlag, 2007. Т. 4437 LNCS. С. 249-264.
17. Westfeld A. Generic adoption of spatial steganalysis to transformed domain // *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*. Springer Verlag, 2008. Т. 5284 LNCS. С. 161-177.
18. Holub V., Fridrich J. Low Complexity Features for JPEG Steganalysis Using Undecimated DCT. 2014.
19. Farid H. Detecting hidden messages using higher-order statistical models // *IEEE International Conference on Image Processing*. 2002. Т. 2.
20. Lyu S., Farid H. Detecting hidden messages using higher-order statistics and support vector machines // *Lect. Notes Comput. Sci. (including Subser. Lect. Notes Artif. Intell. Lect. Notes Bioinformatics)*. Springer Verlag, 2003. Т. 2578. С. 340-354.
21. Cohen A.S. The gaussian watermarking game / A.S. Cohen, A. Lapidot // *IEEE Transactions on Information Theory*. 2002. Vol. 48(6). P. 1639-1667.

References:

1. National Natural Science Foundation of China [Electronic resource]. URL: http://www.nsf.gov.cn/english/site_1/index.html (date of the application: 19.06.2021).
2. Ministry of Science and Technology of the People's Republic of China [Electronic resource]. URL: <http://en.most.gov.cn/> (date of the application: 19.05.2021).
3. Chinese Academy of Sciences [Electronic resource]. URL: <https://english.cas.cn/> (date of the application: 19.05.2021).
4. Cheddad A. и др. Digital image steganography: Survey and analysis of current methods. *Signal Processing*. 2010; 90(3):727-752.
5. Li B. and etc. A Survey on Image Steganography and Steganalysis. *Journal of Information Hiding and Multimedia Signal Processing* 2011; 2(2):15-30
6. Dalal M., Juneja M. Steganography and Steganalysis (in digital forensics): a Cybersecurity guide. *Multimed. Tools Appl.* Springer, 2021;80(4):5723-5771.
7. Breaking a steganography software: Camouflage [Electronic resource]. URL: <http://www.guillermi2.net/stegano/camouflage/index.html> (дата обращения: 20.05.2021).
8. Breaking a steganography software: JpegX [Electronic resource]. URL: <http://www.guillermi2.net/stegano/jpegx/index.html> (дата обращения: 20.05.2021).
9. Analyzing steganography softwares [Electronic resource]. URL: <http://www.guillermi2.net/stegano/> (date of the application 20.05.2021).
10. Fridrich J., Goljan M. Practical steganalysis of digital images: state of the art. *Security and Watermarking of Multimedia Contents IV. SPIE*, 2002; 4675: 1-13.
11. Kodovský J., Fridrich J. JPEG-compatibility steganalysis using block-histogram of recompression artifacts . *Lecture Notes in*

- Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). Springer, Berlin, Heidelberg, 2013; 7692 LNCS: 78-93.
12. Chandramouli R., Kharrazi M., Memon N. Image steganography and steganalysis: Concepts and practice. Lect. Notes Comput. Sci. (including Subser. Lect. Notes Artif. Intell. Lect. Notes Bioinformatics). Springer Verlag, 2004; 2939: 35-49.
 13. Fridrich J., Du R., Long M. Staganalysis of LSB encoding in color images. IEEE International Conference on Multi-Media and Expo. 2000; III/WEDNESDAY:1279-1282.
 14. Fridrich J., Goljan M., Du R. Reliable detection of LSB steganography in color and grayscale images. Proceedings of the ACM International Multimedia Conference and Exhibition, Association for Computing Machinery (ACM), 2001; II: 27-30.
 15. Lerch-Hostalot D., Megias D. Unsupervised steganalysis based on artificial training sets. Eng. Appl. Artif. Intell. Elsevier Ltd, 2016; 50: 45-59.
 16. Shi Y.Q., Chen C., Chen W. A Markov process based approach to effective attacking JPEG steganography. Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). Springer Verlag, 2007; 4437 LNCS: 249-264.
 17. Westfeld A. Generic adoption of spatial steganalysis to transformed domain .Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). Springer Verlag, 2008; 5284 LNCS: 161-177.
 18. Holub V., Fridrich J. Low Complexity Features for JPEG Steganalysis Using Undecimated DCT. 2014.
 19. Farid H. Detecting hidden messages using higher-order statistical models. IEEE International Conference on Image Processing. 2002; 2.
 20. Lyu S., Farid H. Detecting hidden messages using higher-order statistics and support vector machines. Lect. Notes Comput. Sci. (including Subser. Lect. Notes Artif. Intell. Lect. Notes Bioinformatics). Springer Verlag, 2003; 2578: 340-354.
 21. Cohen A.S. The gaussian watermarking game / A.S. Cohen, A. Lapidot // IEEE Transactions on Information Theory. 2002; 48(6): 1639-1667.

Сведения об авторах:

Тебужева Фариза Биляловна, доктор физико-математических наук, доцент, заведующая кафедрой компьютерной безопасности; ftebueva@ncfu.ru

Огур Максим Геннадьевич, старший преподаватель кафедры компьютерной безопасности, mogur@ncfu.ru

Мандрица Игорь Владимирович, доктор экономических наук, доцент, профессор кафедры информационной безопасности; imandritsa@ncfu.ru

Чернышев Александр Борисович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры систем управления и информационных технологий; achernyshev@ncfu.ru

Линец Геннадий Иванович, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой инфокоммуникаций; glinetc@ncfu.ru

Мочалов Валерий Петрович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры инфокоммуникаций; vmochalov@ncfu.ru

Information about authors:

Fariza B. Tebueva, Dr. Sci. (Eng), Assoc. Prof., Head of Computer Security Department; ftebueva@ncfu.ru

Maxim G. Ogur, Senior Lecturer, Computer Security department; mogur@ncfu.ru

Igor V. Mandritsa, Dr. Sci. (Eng), Assoc. Prof., Professor of Department of Information Security; imandritsa@ncfu.ru

Alexander B. Chernyshev, Dr. Sci. (Eng), Prof., Professor of Department of Management Systems and Information Technology; achernyshev@ncfu.ru

Gennady I. Linets, Dr. Sci. (Eng), Assoc. Prof., Head of Infocommunications Department; glinetc@ncfu.ru

Valery P. Mochalov, Dr. Sci. (Eng), Prof., Professor of Infocommunications Department; vmochalov@ncfu.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/ Received 15.09.2022.

Одобрена после рецензирования / Reviced 12.10.2022.

Принята в печать /Accepted for publication 12.10.2022.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 004.4'236

DOI: 10.21822/2073-6185-2022-49-4-126-133

Оригинальная статья /Original Paper

**Алгоритм проектирования несущих конструкций многоэтажного здания
с использованием среды визуального программирования DYNAMO STUDIO**

Т.А. Юрошева, А.В. Калининченко, В.Г. Макиев

Северо – Кавказский горно-металлургический институт
(Государственный технологический университет),
362021, г. Владикавказ, ул. Николаева, 44, Россия

Резюме. Цель. Статья посвящена актуальной проблеме минимизации времени работы проектировщика с применением Dynamo Studio в качестве мощного инструмента автоматизации задач проектирования. **Метод.** Приведено описание некоторых возможностей среды визуального программирования Dynamo Studio при разработке проекта здания в программном комплексе Revit. **Результат.** Представлены и описаны методики работы сценариев Dynamo, позволяющие существенно ускорить процессы моделирования и подготовки проектной документации. Принципы информационного моделирования позволяют увеличить скорость выполняемой проектной работы, не сказываясь пагубно на ее качестве. Это позволяет избежать широкого ряда ошибок при проектировании, что в дальнейшем не приведет к соответствующим проблемам на этапе строительства объекта. Представлены результаты применения разработанных алгоритмов для автоматизированного построения трехмерной модели многоэтажного здания. **Вывод.** Использование среды визуального программирования позволяет создавать информационную модель, которая обновляет свою конфигурацию при изменении входящих в нее элементов.

Ключевые слова: информационное моделирование, автоматизация, визуальное программирование, программный код, оператор

Для цитирования: Т.А. Юрошева, А.В. Калининченко, В.Г. Макиев. Алгоритм проектирования несущих конструкций многоэтажного здания с использованием среды визуального программирования DYNAMO STUDIO. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022; 49(4):126-133. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-4-126-133

Algorithm for designing load-bearing structures of a multi-storey building using the visual programming environment DYNAMO STUDIO

T.A. Yurosheva, A.V. Kalinichenko, V.G. Makiev

North Caucasus Mining and Metallurgical Institute (State Technological University)
44 Nikolaeva Str., Vladikavkaz 362021, Russia

Abstract. Objective. The article is devoted to the actual problem of minimizing the designer's work time using Dynamo Studio as a powerful tool for automating design tasks. **Method.** A description of some of the possibilities of the Dynamo Studio visual programming environment when developing a building project in the Revit software package is given. **Result.** Dynamo scripts work methods are presented and described, which allow to significantly speed up the processes of modeling and preparation of project documentation. The principles of information modeling make it possible to increase the speed of the project work being carried out without adversely affecting its quality. This makes it possible to avoid a wide range of design errors, which in the future will not lead to corresponding problems during the construction phase of the facility. The results of the application of the developed algorithms for the automated construction of a three-dimensional model of a multi-storey building are presented. **Conclusion.** Using the visual programming environment allows you to create an information model that updates its configuration when the elements included in it change.

Keywords: information modeling, automation, visual programming, program code, operator

For citation: T.A. Yurosheva, A.V. Kalinichenko, V.G. Makiev. Algorithm for designing load-bearing structures of a multi-storey building using the visual programming environment DYNAMO STUDIO. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science. 2022; 49(4):126-133. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-4-126-133

Введение. Процесс проектирования можно представить, как пошаговый набор действий, выполняемых по определенному алгоритму. В этом же ключе работает система DYNAMO. Она представляет алгоритмы в наглядном формате, доступном для понимания пользователями без специальных знаний в области программирования.

Визуальное программирование – современная альтернатива текстовым форматам программирования (с использованием языков программирования). Вместо ввода текста со сложными и строгими правилами, достаточно соединять предварительно разработанные готовые узлы вместе, последовательно добываясь нужной информации. Каждый узел уже содержит в себе куски кода, которые пришлось бы создавать в процессе классического программирования – получается некий конструктор алгоритма.

Dynamo – среда визуального программирования с открытым программным кодом. Главным назначением среды является создание новых программных функций, позволяющих анализировать большие массивы данных и оптимизировать рутинные процессы. Процесс визуального программирования среды Dynamo можно представить, как последовательный набор действий, выполняемых по заданному алгоритму. Данный алгоритм выполняется с помощью предварительно разработанных текстовых фрагментов программного кода – узлов (англ. node), последовательность которых составляет сценарий (англ. script) [1]. В данной работе описаны созданные алгоритмы Dynamo, позволяющие автоматизировать моделирование несущих конструкций многоэтажного здания в программном комплексе Revit.

Постановка задачи. На данный момент проектирование вышло на такой уровень, при котором обеспечивается возможность не только построения трехмерной модели и заданий элементам всех необходимых свойств, но также и автоматизированного создания отдельных элементов сооружения. Речь идет о том, что современные программы строительного проектирования предусматривают возможность создания дополнений или макросов с использованием стандартных языков программирования, владение которыми, тем не менее, требует наличия у проектировщика дополнительных компетенций.

Данное обстоятельство определило целесообразность проведения исследования, целью которого является разработка алгоритма создания различных элементов строительных конструкций, либо монотонно повторяющихся операций с использованием средств автоматизации в составе программных сред строительного проектирования.

Для достижения указанной цели в рамках исследования были поставлены и решены следующие задачи:

1. Оценить возможность применения среды визуального программирования при разработке информационной модели проектируемой строительной конструкции замкнутого типа.
2. Создание обобщенного алгоритма проектирования элементов строительной конструкции замкнутого типа; осуществление монотонных процессов, с использованием средств автоматизации в составе программных сред строительного проектирования.
3. Реализация разработанного алгоритма на практическом примере.

Методы исследования. Прежде всего, следует отметить, что решение современных задач в области автоматизированного строительного проектирования предполагает последовательную реализацию двух видов процессов [2]:

Алгоритмизация – заключается в разработке алгоритма как набора инструкций, последовательное выполнение которых на основе данных, задаваемых пользователем (имплементация), в соответствующей программной среде обеспечит построение модели строительного объекта

или его отдельных элементов в информационном аспекте – в виде массивов данных и различных взаимосвязей между ними. В наиболее общем случае обеспечивается визуальными редакторами программирования, зачастую являющимися надстройками для программных сред трехмерного моделирования.

Визуализация – предполагает графическую интерпретацию (как правило, в трехмерном пространстве) информационной модели строительного объекта или его отдельных элементов как результата выполнения алгоритма. В наиболее общем случае обеспечивается современными программными средами трехмерного моделирования.

Алгоритм автоматизированного создания уровней проектируемой модели. Результатом работы алгоритма, схема которого показана на рис. 1. являются уровни модели, построенные по predetermined параметрам этажности. Они также добавлены в план этажей, для дальнейшего удобного пользования.

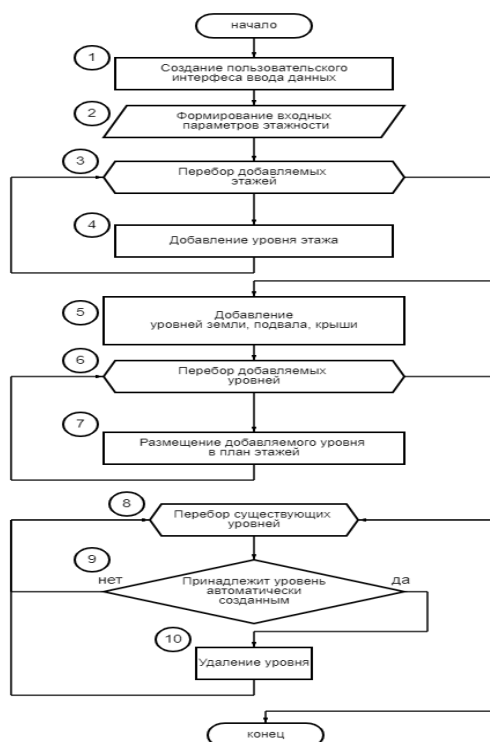


Рис.1. Алгоритм автоматизированного создания уровней
Fig.1. Algorithm for automated creation of levels

Данное решение позволяет свести к минимуму трудозатраты по созданию и правильному переименованию уровней:

1. Пользовательский интерфейс создается посредством подключения пакета Data-Shapes и использования его нодов для расширения функций скриптов Dynamo.
2. Входные параметры включают в себя: количество этажей в проектируемом здании; высота этажей.
3. Перебираем пользовательское количество этажей для дальнейшей вставки в проектируемую модель.
4. Добавление этажа осуществляется функцией «Level.ByElevationAndName». Она позволяет создавать уровень, учитывая высоту и имя.
5. Добавление уровня земли, крыши и подвала осуществляет та же функция.
6. Перебираем созданные пользователем уровни.
7. Размещаем созданные уровни в план этажа проекта. Осуществляется это посредством использования узла «Views.FloorPlanView.ByLevel».
8. Перебираем все уровни, существующие в проекте.
9. Проверяем, принадлежит ли уровень автоматически созданному программным обеспе-

чением в проекте. Если да, то этот уровень удаляется. В противном случае берётся следующий уровень.

10. Удаляется уровень функцией Delete().

Алгоритм копирования типового этажа на выбранные уровни. В первую очередь для сокращения времени проектирования был применен сценарий по копированию имеющихся в модели элементов на остальные уровни жилых этажей с указанием, на какие именно этажи должно быть произведено копирование. Алгоритм этого сценария продемонстрирован на рис. 2.

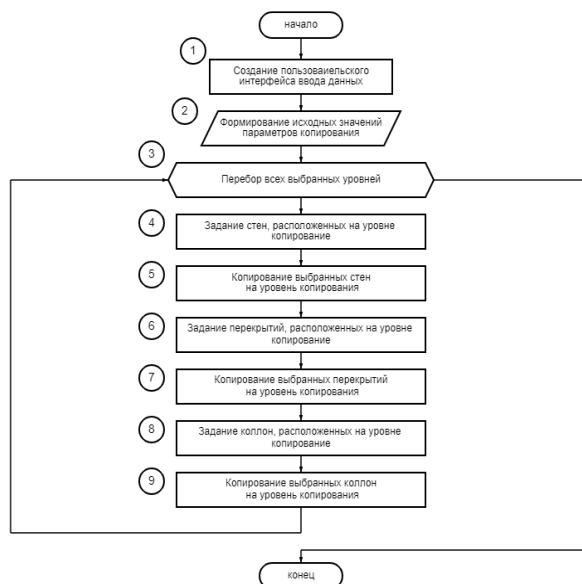


Рис.2. Алгоритм копирования элементов

Fig.2. Algorithm for copying elements

Главными преимуществами данного подхода по сравнению с применением собственных инструментов системы автоматизированного проектирования являются скорость выполнения процесса и его точность:

1. Пользовательский интерфейс создаётся на основе пакета нодов Data-Shapes, позволяющий выбрать этаж для копирования, и уровни, на которые происходит копирование.
2. Исходные данные определяются особенностями объекта проектирования и решаемой задачи. Они включают в себя: этаж, конструкции которого используются для копирования; уровни, предназначенные для копирования.
3. Перебираем уровни, выбранные для копирования.
4. Задание стен на выбранном уровне осуществляется путем получения всех элементов, расположенных в модели на указанной отметке («All Element at level»). И дальнейшей фильтрации («Element.IsOfCategory», «List.FilterByBoolMask»), путем поиска соответствий с выбранной категорией («Categories» – стены).
5. Загружаем пользовательский пакет нодов «Clockwork»; применим узел «Element.CopyToLevel». Он осуществляет копирование выбранных элементов на нужные уровни.
6. Задание перекрытия осуществляется аналогично стенам.
7. Процесс копирования перекрытий также производится аналогично стенам.
8. Задание колонн осуществляется аналогично стенам.
9. Процесс копирования колонн также производится аналогично стенам.

Скрипт автоматического создания уровней проектируемой модели. Сценарий создания уровней, изображенный на рис. 3. представляет собой последовательность узлов, выполняющих соответствующие функции в указанном порядке:

1. Создание пользовательского интерфейса ввода данных о параметрах проектируемых уровней.

2. Написание встроенного сценария Python создания уровней и добавления их в план этажей, как показано на рис. 3.

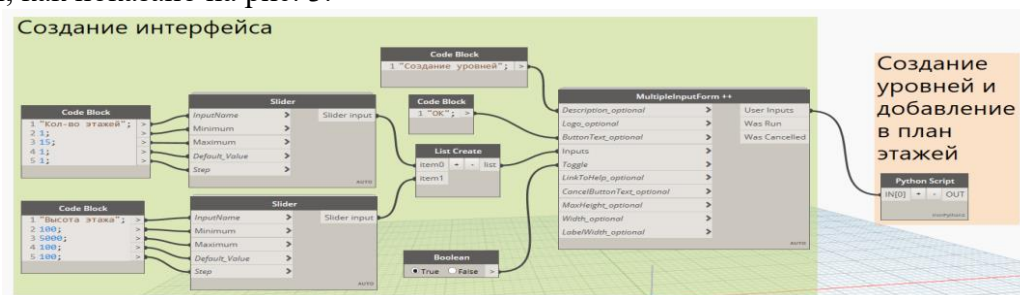


Рис.3. Скрипт создания уровней
 Fig.3. Script for creating levels

Так как в базовый функционал Dynamo не входят инструменты, создающие окно представлений, воспользуемся возможностью загрузить пакет узлов Data-Shapes. Основной целью, которого является увеличение спектра функциональных возможностей проигрывателя Dynamo [3]. Значения количества и высоты этажей задается с помощью узла “Slider”, который создаёт ползунки ввода в форме. Нод “List Create” позволяет вводить входные данные в виде списка. Формированием интерфейса занимается узел “MultipleInputForm++”. Он способен интерпретировать всю входную информацию, создавать форму пользовательского интерфейса, а затем возвращать полученные данные.

Также мы можем задать описание формы (“Description_optional”), текст кнопки (“ButtenText_optional”) и переключатель (“toggle”). Для переключения UI.MultipleInputForm++ должно быть установлено значение "true" [2]. Этот ввод имеет решающее значение, поскольку он позволяет лучше контролировать порядок, в котором будет функционировать скрипт, показанный на рис. 4.

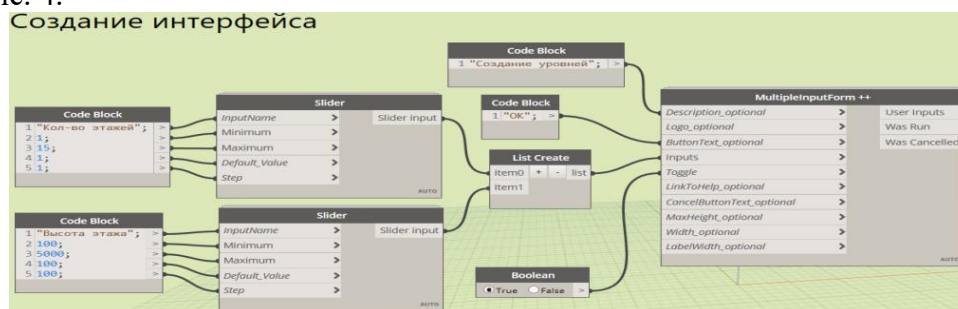


Рис.4. Сценарий формирования интерфейса
 Fig.4. Interface formation scenario

Результат выполнения сценария формирования интерфейса представлен на рис. 5.

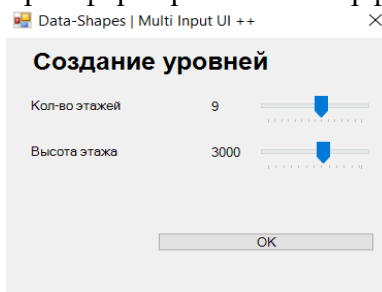


Рис.5. Результат выполнения сценария формирования интерфейса
 Fig.5. The result of the execution of the interface formation script

Пользовательские входные данные обрабатываются в «Python Script», который позволяет расширить возможности Dynamo и заменить большое количество узлов компактными строками кода. Программный модуль, показанный на рис. 6, осуществляет построение уровней по заданным значениям и добавление их в план этажей.

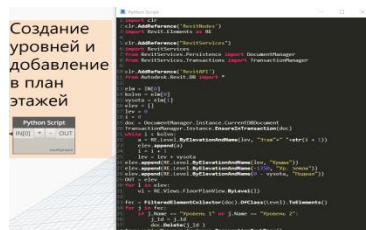


Рис.6. Скрипт, создающий пользовательские уровни и добавляет их в план этажей

Fig.6. Script that creates custom levels and adds them to the floor plan

Для создания пользовательских сценариев и обеспечения доступа к API Revit подключаем следующие библиотеки:

1. “RevitNodes” – позволяет в Python Script использовать стандартные узлы Dynamo.
2. “RevitServices” – предназначен для связи Dynamo и Revit, импортируя DocumentManger (выдаёт проект, с которым мы работаем) и Transaction.Manager (даёт возможность внести изменения в проект).
3. “RevitAPI” – содержит множество методов Revit.

В качестве входных данных Python Script возьмём значения количества этажей (kolvo) и их высоту (vysota). Создадим список elev[], куда будем добавлять генерируемые уровни. Затем начнем перебор уровней. Их создание осуществляется командой “Level.ByElevationAndName”. Функцией elev.append() добавим этаж в список elev. Также необходимо добавить сгенерированные уровни в план этажей (“Views.FloorPlanView.ByLevel()”). Так как Revit по умолчанию создаёт 2 уровня, их необходимо удалить (“doc.Delete()”). Для копирования конструкций был использован скрипт, продемонстрированный на рис. 7. Он выполняется в следующем порядке:

1. Создание пользовательского интерфейса ввода данных о параметрах копирования.
2. Копирование и перенос стен на выбранные уровни.
3. Копирование и перенос перекрытий на выбранные уровни.
4. Копирование и перенос колонн на выбранные уровни.

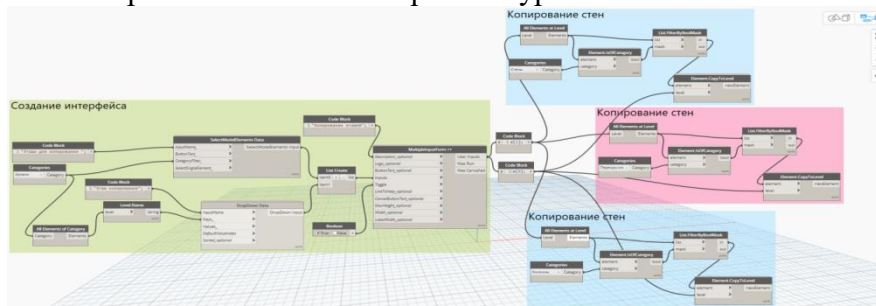


Рис.7. Скрипт копирования типового этажа на выбранные уровни

Fig.7. Script for copying a typical floor to selected levels

Пользовательский интерфейс, скрипт которого представлен на рис. 8., создаётся нодами из пакета Data-Shapes. Этаж, элементы которого копируются, задается из выпадающего окна узлом “DropDown Data”. “Keys” – элементы, которые будут показаны пользователю. Они получены путем взятия имен (“Level.Name”) из всех существующих в проекте уровней (“Categories(Уровни)”-“All Elements of Category”). “Values” – это элементы, которые будут возвращены в соответствии с ключами (“Categories(Уровни)”-“All Elements of Category”). Выбором этажей для копирования занимается узел “SelectModelElements Data” [3]. Он предусматривает применение фильтра категории к выбору. Это означает, что пользователь сможет выбирать только указанные категории. Это уменьшает ошибки выбора и гарантирует, что рабочий процесс работает так, как задумано. Поскольку копирование осуществляется на этажи, потому в качестве значения “CategoryFilter” возьмем “Categories (Уровни)”. Входные данные должны вводиться в виде списка, поэтому создадим его нодом “List Create” и подадим в “MultipleinputForm++”. Также мы создадим описание формы (“Description_optional”) и переключатель (“toggle”). Результат выполнения скрипта формирования интерфейса представлен на рис. 9.

граммы содержит необходимые ссылки на форум для обсуждения и веб-сайт продукта [5], при переходе по которым можно найти множество полезных советов по созданию сценариев, ознакомиться с важными понятиями и просмотреть демонстрации использования методов работы с исчерпывающими примерами.

Вывод. Представленные выше алгоритмы являются лишь частными случаями огромного количества возможностей, открывающихся перед пользователем Dynamo. Воплощение данных возможностей позволяет раскрыть весь современный потенциал информационного моделирования. Разработана 3D модель многоэтажного здания с применением скриптов визуального программирования, автоматизирующих выполнение рутинных процессов. Реализация всех вышеизложенных сценариев занимает минимальное количество времени, что подтверждает целесообразность применения Dynamo в качестве мощного инструмента автоматизации задач, которые стоят перед проектировщиками.

Эффективность применения таких сценариев существенно увеличивается при выполнении большого количества повторяющихся однотипных операций, разработке типовых объектов или построении сложной параметрической геометрии. Возможности Dynamo ограничены только возможностями самого проектировщика. Среда визуального программирования поддерживает выполнение внутренних узлов, содержащих фрагменты кода Python, что открывает неограниченные возможности ее применения. Полная и сформированная база сценариев позволяет уменьшить сроки проектирования.

Библиографический список:

1. Смакаев Р.М., Низина Т.А. Автоматизация задач проектирования с помощью среды визуального программирования DYNAMO STUDIO [Электронный ресурс] // *Огарев-online*. - 2020. - №3.
2. Калининченко А.В. О расширении функциональности системы autocad на приме-ре автоматизации проектирования водоснабжения жилых зданий Наука и бизнес: пути развития. 2016. № 6 (60). С. 12-15.
3. Поддорогина Е. А., Шумилов К. А., Мазинг А. А. Разработка строительных объектов в DYNAMO REVIT // BIM-моделирование в задачах строительства и архитектуры: материалы Всерос. науч.-практ. конф., 29-30 марта 2018 г. – СПб: СПбГАСУ, 2018. – С. 177–182.
4. Поддорогина Е. А., Шумилов К. А., Мазинг А. А. Разработка строительных объектов в DYNAMO REVIT // BIM-моделирование в задачах строительства и архитектуры: материалы Всерос. науч.-практ. конф., 29-30 марта 2018 г. – СПб: СПбГАСУ, 2018 – С. 177–182.
5. Официальный сайт поддержки продукта Dynamo Studio [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.dynamoprimer.com/index.html>

References:

1. Smakaev R.M., Nizina T.A. Automation of design tasks using DYNAMO STUDIO visual programming [Electronic resource] *Ogarev-online*. 2020; 3. (In Russ)
2. Kalinichenko A.V. On expanding the functionality of the autocad system using the automation of the design of water supply for residential buildings Science and business: development path. 2016; 6 (60): 12-15. (In Russ)
3. Poddorogina E. A., Shumilov K. A., Mazing A. A. Development of construction objects in DYNAMO REVIT // BIM-modeling in construction tasks and architecture: materials of All-Russian Scientific and Practical Conference, March 29-30, 2018 St. Petersburg: SPbGA-SU, 2018; 177-182. (In Russ)
4. Poddorogina E. A., Shumilov K. A., Mazing A. A. Development of construction objects in DYNAMO REVIT // BIM-modeling in construction tasks and architecture: materials of All-Russian Scientific and Practical Conference, March 29-30, 2018 – St. Petersburg: SPbGA-SU, 2018; 177-182. (In Russ)
5. <https://www.dynamoprimer.com/index.html> Official website of Dynamo Studio product support [El.res.]. Access mode:

Сведения об авторах:

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

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

Макиев Владимир Георгиевич, магистр, volodya.maki@yandex.ru

Information about authors:

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

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

Vladimir G. Makiev, Master, volodya.maki@yandex.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/ Received 15.09.2022.

Одобрена после рецензирования / Reviced 12.10.2022.

Принята в печать /Accepted for publication 12.10.2022.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 004.056

DOI: 10.21822/2073-6185-2022-49-4-134-141

Обзорная статья / Review article

Обзор и группировка оценочных критериев эффективности мобильных приложений
Э.И. Янгиров¹, А.И. Мифтахова¹, Е.И. Карасева¹, А.И. Янгиров², Е.Ю. Никулина³

¹Университет ИТМО,

¹197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский проспект, д.49, лит. А, Россия,

²ФКУ «НИЦ «Охрана» Росгвардии,

²111539, г. Москва, ул. Реутовская, 12Б, Россия,

³Воронежский институт МВД России,

³394065, г. Воронеж, пр. Патриотов, 53, Россия

Резюме. Цель. Исследование проводится с целью выявления наиболее ценных метрик для аналитики мобильного приложения и оценки его эффективности; рассмотрения состояния и тенденций развития рынка мобильных приложений в РФ; определения приоритетных направлений оценки эффективности мобильных приложений. **Методы.** Применяются методы анализа перспективных научных источников в области разработки мобильных приложений, а также рассматриваются тенденции развития данного направления в РФ с учетом политико-социальных явлений, что позволяет выделить причинно-следственные связи направлений разработки мобильных приложений на рынке РФ, а также выявить перспективные оценочные критерии эффективности мобильных приложений. Для оценки эффективности оценочных показателей применяются методы сравнительного анализа данных мобильных приложений. Полученные сведения позволяют рассмотреть проблемы разработки мобильных приложений с новой точки зрения. **Результат.** Представлены результаты анализа научных источников, выявлены основные оценочные критерии эффективности мобильных приложений, проведена их структуризация, выделены взаимосвязи между ними. **Вывод.** Представленные в статье показатели эффективности применимы для прогнозирования конкурентоспособности мобильных приложений и оценки их привлекательности для пользователей. Для успешного измерения эффективности мобильных приложений необходимо учитывать важные для конкретного продукта оценочные критерии в совокупности, что способствует упрощению выявления аспектов мобильных приложений, нуждающихся в изменении и модификации.

Ключевые слова: мобильные приложения, рынок мобильных приложений, эффективность мобильных приложений, оценочные критерии, метрики

Для цитирования: Э.И. Янгиров, А.И. Мифтахова, Е.И. Карасева, А.И. Янгиров, Е.Ю. Никулина. Обзор и группировка оценочных критериев эффективности мобильных приложений. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022; 49(4):134-141. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-4-134-141

Overview and grouping of evaluation criteria for the effectiveness of mobile applications

E.I. Yangirov¹, A.I. Miftakhova¹, E.I. Karaseva¹, A.I. Yangirov², E.Yu. Nikulina³

¹ITMO University,

¹49, lit. A, Kronverksky Ave., St. Petersburg 197101, Russia,

²FKU "Research Center "Protection" of the Russian Guard,

²12B Reutovskaya Str., Moscow 111539, Russia,

³Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia,

³53 Patriotov Ave., Voronezh 394065, Russia

Abstract. Objective. The study is conducted in order to identify the most valuable metrics for mobile application analytics and evaluate its effectiveness; consideration of the state and development

trends of the mobile application market in the Russian Federation; determining priority areas for evaluating the effectiveness of mobile applications. **Method.** To achieve this goal, methods of analyzing promising scientific sources in the field of mobile application development are used, and development trends in this area in the Russian Federation are considered, taking into account political and social phenomena. This allows us to highlight the cause-and-effect relationships of the position of the direction of mobile application development in the market of the Russian Federation, as well as to identify promising evaluation criteria for the effectiveness of mobile applications. The information obtained allows us to consider the problems of developing mobile applications from a new point of view. To evaluate the effectiveness of performance indicators, methods of comparative analysis of mobile application data are used. **Result.** The results of the analysis of scientific sources are presented, the main evaluation criteria for the effectiveness of mobile applications are identified, their structuring is carried out, and the relationships between them are highlighted. **Conclusion.** The performance indicators considered in this study are applicable for predicting the competitiveness of mobile applications and assessing their attractiveness to users. It should be noted that in order to successfully measure the effectiveness of mobile applications, it is necessary to take into account the evaluation criteria that are important for a particular product in the aggregate. This makes it easier to identify aspects of mobile applications that need to be changed and modified.

Keywords: mobile applications, mobile applications market, mobile applications efficiency, evaluation criteria, metrics

For citation: E.I. Yangirov, A.I. Miftakhova, E.I. Karaseva, A.I. Yangirov, E.Yu. Nikulina. Overview and grouping of evaluation criteria for the effectiveness of mobile applications. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science. 2022; 49(4):134-141. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-4-134-141

Введение. Вместе с ростом популярности мобильных приложений возрастает и конкуренция среди компаний–разработчиков мобильного сегмента рынка. Актуальность настоящей статьи предопределена обострением конкуренции среди сегмента мобильных приложений в условиях рыночной экономики. Это вынуждает предпринимателей повышать эффективность ключевых показателей, а также внедрять инновационные средства для оценки мобильных приложений, на основе анализа которых возможно повысить уровень конкурентоспособности выпускаемой продукции.

Постановка задачи. Целями исследования являются анализ состояния и тенденций рынка мобильных приложений в Российской Федерации, обобщение теоретических положений оценки (метрик) мобильных приложений.

Методы исследования. В данном исследовании применяются следующие методы:

- анализ научных источников по разработке мобильных приложений;
- анализ тенденций развития направления разработки мобильных приложений в РФ;
- сравнительный анализ данных мобильных приложений для оценки эффективности оценочных показателей;
- структуризация полученной информации.

В настоящее время мировые тенденции глобальной телефонизации и высокоскоростного интернета привели к активному росту рынка мобильных приложений. Во многом это связано с постоянным желанием людей оставаться «онлайн». Уровень спроса на мобильные приложения также растет. Инвестиционный банк приложений и игр «Digi–Capital» опубликовал свой анализ российского рынка мобильных приложений. Статистика, представленная на рис.1, демонстрирует, что доход данного рынка с каждым годом растет, в 2017 году он оценивался в размере \$ 70 млрд. [1].

Пандемия 2020 года негативно отразилась на российском рынке. Наиболее тяжелые последствия коснулись не готовых к цифровой трансформации сфер бизнеса. Однако для отрасли информационных технологий, в которую входит сегмент мобильных приложений, ситуация

сложилась выгодно. В условиях пандемии среди российских пользователей стали популярными мобильные приложения, позволяющие совершать бесконтактные банковские переводы, интернет-магазины доставки продуктов и товаров, социальные сети.

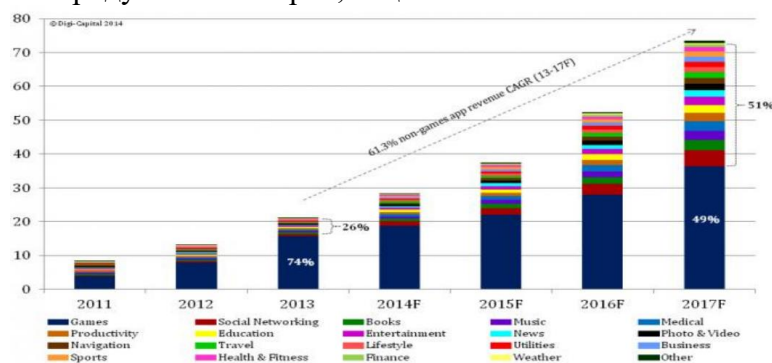


Рис.1. Состояние рынка мобильных приложений в России
Fig.1. The state of the mobile application market in Russia

Особую востребованность получили приложения, направленные на дистанционное обучение, видео-стриминговые сервисы, фитнес-приложения, а также приложения по медицинскому обслуживанию населения. Кроме того, на мобильные игры приходится 34% российского оборота видеоигр [3], а в 2019 году Российский рынок мобильной разработки вырос на 40% [4]. Фактически ежемесячное время, проведенное в мобильных приложениях, выросло на 40%: суммарно в месяц пользователи уделяли им более 200 млрд. часов, утверждают исследователи из аналитической компании AppAnnie [5].

Одновременно с этим на фоне санкций западных стран сократилось количество рабочих мест для IT-специалистов, что не может положительно влиять на тенденции развития сегмента рынка мобильных приложений. Из-за ухода иностранных IT-компаний, а также оптимизации рабочих процессов, в России может возникнуть переизбыток IT-специалистов [6].

В данных условиях возрастает конкуренция как на мировом рынке, так и на внутреннем. Наличие в организации мобильного приложения является одним из ее конкурентных преимуществ и влияет на уровень её конкурентоспособности [7]. Применение инновационных технологий в обеспечении рабочих процессов организаций становится уже не просто роскошью, а принципиальной необходимостью.

Обсуждение результатов. Российский сегмент рынка мобильных приложений имеет положительный рост, а также широкий охват пользователей. Наличие в РФ негативных экономических факторов в IT-отрасли приводит к росту конкуренции как среди разработчиков мобильных приложений, так и среди потребителей (организаций). В связи с этим важную роль начинает играть существенно более качественный подход к разработке мобильных приложений, соответственно, появляется потребность в комплексном анализе и оценивании мобильных приложений.

Критерии оценки (метрики) эффективности мобильных приложений. В условиях жесткой конкуренции создание эффективного мобильного приложения довольно затруднительно.

В связи с этим возникает необходимость построения грамотной стратегии развития приложения и оценки его конкурентоспособности на каждом этапе его жизненного пути. Наиболее целесообразно оценивать коммерческий потенциал мобильных приложений с помощью специальных показателей эффективности – метрик. Это обусловлено тем, что метрики позволяют получить обратную связь от пользователей, в виде информации об их поведении внутри приложения. Аналитика этих данных, в свою очередь, оказывает существенное влияние на принятие стратегических решений. Разработка и запуск мобильного приложения – только начало его жизненного пути. Для того, чтобы оно выполняло свою основную задачу, заключающуюся в получении прибыли, необходимо также правильно продвигать продукт среди потенциальных пользователей. Существует несколько этапов, которые пользователю необходимо пройти для реализации коммерческого потенциала продукта [8]:

- «приобретение» – пользователи скачивают приложение себе на устройство (мобильный/планшет) и знакомятся с ним;
- «использование» – понравившееся приложение часто используют, а не понравившееся – удаляют;
- «активное использование» – пользователи приложения с большой вероятностью совершат в нем покупки за реальные деньги.

На каждом из перечисленных этапов использования мобильного приложения существуют свои показатели, которые помогают понять, насколько успешно работает продукт и какую обратную связь дают пользователи своим поведением. Ключевые показатели можно разделить на следующие группы – метрики [9]: метрики привлечения пользователей; метрики удержания пользователей; метрики монетизации; метрики активности и вовлеченности пользователей; метрики виральности.

Оценку эффективности привлечения пользователей проводят с помощью следующих основных метрик продвижения: новые пользователи (New users), общее количество пользователей (Total users). Исходя из исследований, приведенных в [10] и [11], следует отметить, что эти метрики не отражают конкурентоспособность приложения в целом и его коммерческий потенциал, но по ним можно судить об эффективности продвижения продукта. Анализ метрик продвижения с учетом источника установки приложения позволяет оценить эффективность рекламного канала, через который проводится привлечение новых клиентов.

Следующий этап заключается в удержании пользователей. От коэффициента удержания (Retention Rate) во многом зависит успех бизнеса, перспективы монетизации и роста [12]. Он дает понять, как часто пользователи возвращаются к приложению после его установки. Анализ [13] показывает, что в среднем приложения теряют 65% своих пользователей в первую неделю, в то время как очень популярные приложения (топ-100) теряют только 35% (рис. 2). Однако это также показывает, что многие приложения имеют более сложные модели поведения под влиянием сезонности, маркетинга или других факторов. Таким образом, показатели удержания сами по себе не являются достаточным критерием успеха приложения, поскольку они не учитывают колебания мгновенного использования, влияние сезонности, внешние и другие факторы.

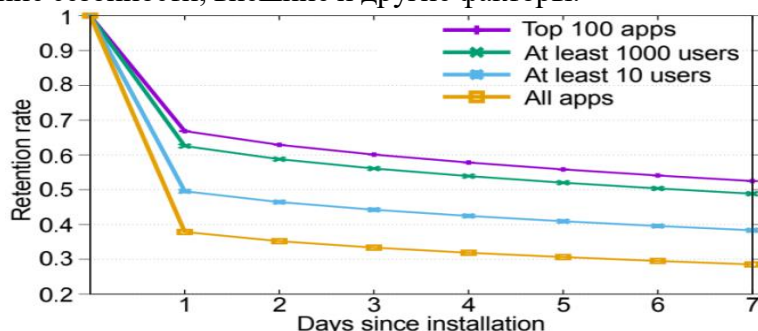


Рис.2. График изменения коэффициента удержания в зависимости от времени для приложений с разным количеством пользователей [13]

Fig.2. Graph of the change in the retention rate depending on time for applications with different numbers of users [13]

Важным является также этап монетизации приложения. Подавляющее большинство пользователей не приносят доход, создавая издержки для бизнеса. Цель проведения анализа эффективности мобильного приложения на этой стадии состоит в том, чтобы способствовать снижению этих издержек за счет увеличения числа пользователей, совершающих внутренние покупки. Для увеличения количества платящих пользователей проводится сравнение различных стратегий монетизации, вводятся специальные платные предложения, производится реинвестирование дохода от приложения в привлечение новых клиентов. Согласно [14] существует три основных показателя для измерения эффективности монетизации: средний доход на одного активного пользователя в день (ARPPU), средний доход на платящего пользователя (ARPPU), пожизненная ценность клиента (LTV). Показатель ARPPU позволяет отслеживать колебания

ежедневной выручки. Это важно для выявления реакции пользователей на изменение стратегии монетизации, например, при повышении или понижении стоимости товара внутри приложения.

Средний доход на платящего пользователя ARPPU показывает доход от совершенных покупок. Этот показатель является более предпочтительным при оценке рентабельности приложения в сравнении с не менее популярной метрикой ARPU, обозначающей средний доход на пользователя, так как показатель ARPU слишком чересчур усреднен. Пожизненная ценность клиента (LTV) показывает в денежном эквиваленте во сколько бизнесу обходится приобретение и потеря одного пользователя.

Этот показатель позволяет прогнозировать эффективность рекламной кампании и примерно оценивать шансы продукта на успех. Для этого LTV сравнивается с эффективной стоимостью установки приложения (eCPI). Если LTV выше eCPI, то реклама будет самоокупаться [15]. Кроме вышеописанных показателей применяется уровень вовлеченности пользователей как показатель успеха мобильного приложения.

В частности, метрики вовлеченности приобретают большое значение, если монетизация приложения напрямую зависит от времени, проводимого пользователями в приложении. Измерение вовлеченности и активности в продукт является ключом к пониманию того, насколько устойчив продукт и готов ли он к масштабированию [16].

Для измерения активности и вовлеченности рассчитываются такие метрики, как ежедневная/еженедельная/ежемесячная активность пользователей (DAU/WAU/MAU) [17]. При этом разработчику приложения необходимо определить, кого можно считать активным пользователем и какие его действия определять проявлением активности. Согласно исследованиям, приведенным в [18], под виральностью понимается процесс приглашения существующими пользователями новых, т.е. коэффициент виральности (K) – это метрика, обозначающая количество пользователей в приложении, приглашающих других пользователей [20].

Обычно приток новых пользователей происходит из социальных сетей, форумов, YouTube и других каналов внешней среды.

Коэффициент виральности (K), как и уровень вовлеченности, должен быть существенным. В случае успешности работы приложения данный показатель будет обеспечивать рост числа пользователей в геометрической прогрессии, пока не достигнет насыщения (рис. 3) [19].

Следовательно, стратегия виральности не может применяться пожизненно и не будет приносить дохода в случае насыщения рынка.

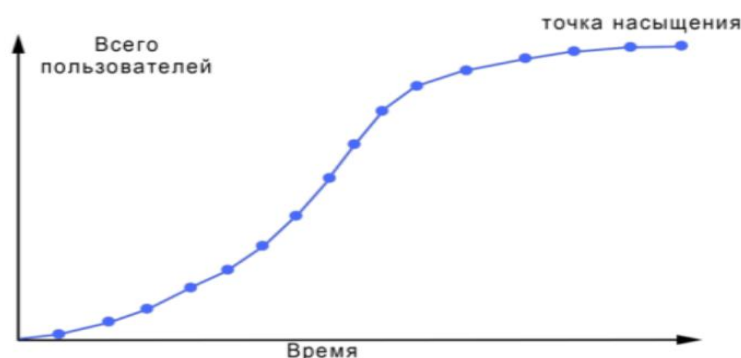


Рис.3. График приближения к точке насыщения [19]
Fig.3. Graph of approaching the saturation point [19]

Кроме того, к виральности можно также отнести и такой параметр, как «сарафанность». Основная цель этой метрики – показать количество пользователей, которые стали пользователями приложения по рекомендации от других пользователей.

Таким образом, можно сгруппировать рассмотренные показатели (метрики) и их ценность при определении эффективности мобильного приложения (табл. 1).

Таблица 1. Метрики мобильного приложения
Table 1. Mobile app metrics

Группа метрик Metric group	Вид метрики Metric type	Ценность Value
Метрики привлечения пользователей User Acquisition Metrics	Новые пользователи (New users)	Не отражают эффективность приложения, но по ним можно судить о качестве продвижения.
	Общее количество пользователей (Total users)	They do not reflect the effectiveness of the application, but they can be used to judge the quality of promotion
	Источник установки приложения Application installation source	Позволяет понять эффективность того или иного рекламного канала. Allows you to understand the effectiveness of a particular advertising channel
Метрики удержания пользователей User retention metrics	Коэффициенты удержания пользователей (Retention Rate), (Rolling Retention), (7-day Retention), (1-day Retention)	Важная метрика, показывает привычку пользователя: то, как часто он возвращается в приложение. Однако не является достаточным показателем успеха, так как игнорирует многие важные факторы, индивидуальные для того или иного продукта. An important metric that shows the user's habit: how often he returns to the application. However, it is not a sufficient indicator of success.
	Показатель оттока пользователей (Churn rate)	Позволяет понять, почему уходят пользователи. Allows you to understand why users leave.
Метрики монетизации Monetization Metrics	Средний доход на одного активного пользователя в день (ARPPU)	Позволяет измерить реакцию на изменение цены. Allows you to measure the response for price changes
	Средняя выручка (ARPU)	Чересчур усредненный показатель. Может помочь измерить реакцию на изменение цены. Average.
	Средний доход на платящего пользователя (ARPPU)	Очень хорошо характеризует повторные платежи. It characterizes repeated payments very well.
	Пожизненный показатель прибыли от одного клиента (LTV)	Помогает прогнозировать будущее и примерно оценивать шансы продукта на успех. Helps predict the future and roughly estimate the product's chances of success.
	Эффективная стоимость установки (eCPI)	Показывает самоокупаемость рекламы. Shows advertising self-sufficiency
Метрики активности и вовлеченности пользователей User Activity and Engagement Metrics	Ежедневная/еженедельная; ежемесячная активность пользователей (DAU/WAU/MAU)	Измерение вовлеченности в продукт является ключом к пониманию того, насколько устойчив продукт и готов ли он к масштабированию. Measuring product engagement is key to understanding how sustainable a product is and whether it is ready to scale.
	Активность лояльных пользователей (LDAU), (LWAU) и (LMAU)	
	Пик пользователей онлайн (PCU)	
	Среднее число пользователей онлайн (ACU)	
Метрики виральности Virality Metrics	Коэффициент виральности (K)	Показывают уровень вирусности приложения. Show the virus level of the application

Вывод. Конкурентоспособность мобильных приложений зависит от множества факторов. К ним можно отнести как внутренние характеристики приложений (качество, работоспособность, расширяемость и др.), так и внешние обстоятельства (факторы, влияющие на популярность приложений, показатели монетизации, виральности и др.).

Используя указанные выше показатели (метрики) мобильных приложений, разработчики могут прогнозировать момент, когда их приложения теряют свою привлекательность для пользователей, а следовательно, применить ту или иную стратегию для повышения популярности своих мобильных приложений.

Подводя итоги, следует отметить, что оценка эффективности мобильных приложений должна основываться на множестве показателей.

Приведенные в настоящем исследовании оценочные критерии (метрики) являются ключевыми в контексте такой оценки. Если объединить их в обобщенную структуру, то можно значительно упростить выявление аспектов мобильных приложений, нуждающихся в корректировке и модификации.

Библиографический список:

1. Максимова, В.А. Мобильное приложение как объект интеллектуальной собственности / В. А. Максимова // Альманах научных работ молодых ученых университета ИТМО: XLVII научная и учебно-методическая конференции Университета ИТМО, Санкт-Петербург, 30 января 2018 года. – Санкт-Петербург: Университет ИТМО, 2018. – С. 101–103. – EDN UXYGWN.
2. Богаченко, Е.А. Рынок мобильных приложений в России и перспективы его развития / Е.А. Богаченко // Цифровизация общества: состояние, проблемы, перспективы: Материалы VIII ежегодной всероссийской научно-практической конференции, Москва, 03 июня 2021 года. – Москва: ФГБОУ ВО «РЭУ им. Г. В. Плеханова», 2021. – С. 42–48. – EDN SESDAG.
3. Николаева, И.В. Тенденции развития видеоигровой индустрии в России и в мире / И.В. Николаева, Н.И. Николаев // Вестник Алтайской академии экономики и права. – 2020. – № 8–2. – С. 277–282. – DOI 10.17513/vaael.1286. – EDN NYGWLI.
4. Российский рынок мобильной разработки вырос на 40% – URL: https://www.cnews.ru/reviews/mobilnost_v_biznese_2020/articles/rossijskij_rynok_mobilnoj_razrabotki (дата обращения: 21.11.2021).
5. Мобильный эффект – URL: <https://www.kommersant.ru/doc/4548686> (22.11.2021).
6. Российским IT-специалистам угрожает нехватка рабочих мест – URL: <https://www.gazeta.ru/tech/news/2022/04/20/17602058.shtml> (дата обращения: 22.04.2022).
7. Пономарева Е.А., Бадюков В.Ф. Мобильные приложения страховых организаций как фактор повышения неценовой конкуренции // Страхование в информационном обществе: Материалы межвузовского научно-методического он-лайн семинара, Хабаровск–Москва, 25 апреля 2019 года / Под научной редакцией Н.Г. Адамчук, Р.Т. Юлдашева, В.Ф. Бадюкова, О.И. Тишутинной. – Хабаровск–Москва: Хабаровский государственный университет экономики и права, 2020. – С. 58–64. – EDN MMYVAK.
8. Галушкина Д.О. Методические основы маркетингового анализа мобильных приложений на примере мобильных игр // Форум молодых ученых. – 2019. – № 2. – С. 503–511.
9. Пуолаканнах К. Монетизация в бизнес-модели free-to-play с точки зрения геймдизайнеров. – 2018.
10. Люн И, Чен С, Лин П, Таи А, Пан Ю, Ксик, С, Лин С Оценка удержания пользователей мобильного приложения: анализ выживания JMIR Mhealth Uhealth 2020;8(11):e16309 URL: <https://mhealth.jmir.org/2020/11/e16309> DOI: 10.2196/16309.
11. Алекса С.В. Метрики и инструменты оценки эффективности внедрения мобильного приложения на рынок // Управленческие науки в современном мире. – 2017. – Т. 1. – С. 48–61.
12. Сигт, Стефан и Лагерспец, Эмиль и Пелтонен, Элла и Нурми, Петтери и Таркома, Сасу. (2016). Суверенитет приложений: релевантность важнее загрузок.
13. Сигт, Стефан и Лагерспец, Эмиль и Пелтонен, Элла и Нурми, Петтери и Таркома, Сасу. (2019). Использование использования для прогнозирования мгновенной популярности приложения: фильтры трендов и коэффициенты удержания. Транзакции АСМ в Интернете. 13. 1–25. 10.1145/3199677.
14. Гончарова Е. Стратегии монетизации бесплатных мобильных игр: кейс: со скамьи. – 2017.
15. Черепанов Е.В. Эффективность мобильного приложения // ББК 60 П27. – 2016. – С. 80.
16. Арескоут Р. Применение бережливой аналитики к показателям эффективности при слияниях и поглощениях. – 2018.
17. Ислам Рахедул и Мазумдер, Тридиб. (2010). Мобильное приложение и его глобальное влияние. Международный журнал техники и технологий. 10. 72–78.
18. Рульков В. С. Маркетинговая стратегия для вывода на рынок мобильного приложения на основе фريمиум-модели // Профессионал года 2019. – 2019. – С. 28–34.
19. Коэн Э.Л. (2015). Что делает хорошие игры вирусными? Роль использования технологий, эффективности, эмоций и удовольствия в решении игроков поделиться просоциальной цифровой игрой. Компьютеры в человеческом поведении, 33, 321–329.
20. Плужник Е.В., Никульчев Е.В. (2015) Виртуальные лаборатории в облачной инфраструктуре образовательных учреждений // 2-я Международная конференция по эмиссионной электронике (ICEE). Избранные статьи; 67–69.

References:

1. Maksimova, V.A. Mobile application as an object of intellectual property. Almanac of scientific works of young scientists of ITMO University: XLVII scientific and educational conference of ITMO University, St. Petersburg, January 30, 2018. - St. Petersburg: ITMO University, 2018; 101–103. – EDN UXYGWH. (In Russ)
2. Bogachenko, E.A. The market of mobile applications in Russia and the prospects for its development. Digitalization of society: state, problems, prospects: Proceedings of the VIII annual all-Russian scientific and practical conference, Moscow, June 03, 2021. - Moscow: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "REU them. G. V. Plekhanov", 2021; 42–48. EDN SESDAG. (In Russ)
3. I.V. Nikolaeva, N.I. Nikolaev. Trends in the development of the video game industry in Russia and in the world. *Bulletin of the Altai Academy of Economics and Law*. 2020; 8(2): 277–282. DOI 10.17513/vaael.1286. – EDN NYGWLI. (In Russ)
4. URL: https://www.cnews.ru/reviews/mobilnost_v_biznese_2020/articles/rossijskij_rynok_mobilnoj_razrabotki The Russian mobile development market grew by 40% - (In Russ)
5. Mobile effect - URL: <https://www.kommersant.ru/doc/4548686> (11/22/2021). (Accessed 11/21/2021). (In Russ)
6. Russian IT specialists are threatened by a lack of jobs URL: <https://www.gazeta.ru/tech/news/2022/04/20/17602058.shtml> (Accessed: 04/22/2022). (In Russ)
7. Ponomareva, E.A. Mobile applications of insurance organizations as a factor in increasing non-price competition / E.A. Ponomarev, V.F. Badyukov // Insurance in the Information Society: Materials of the Interuniversity Scientific and Methodological Online Seminar, Khabarovsk-Moscow, April 25, 2019 / Edited by N.G. Adamchuk, R.T. Yuldasheva, V.F. Badyukova, O.I. Tishutina. - Khabarovsk-Moscow: Khabarovsk State University of Economics and Law, 2020; 58–64. – EDN MMYVAK. (In Russ)
8. Galushkina D.O. Methodical bases of the marketing analysis of mobile applications on the example of mobile games. *Forum of young scientists*. 2019; 2: 503–511. (In Russ)
9. Puolakanaho K. Monetization in free-to-play business model from a game designers point of view. 2018. (In Russ)
10. Lin Y, Chen S, Lin P, Tai A, Pan Y, Hsieh C, Lin S Assessing User Retention of a Mobile App: Survival Analysis JMIR Mhealth Uhealth 2020;8(11):e16309 URL: <https://mhealth.jmir.org/2020/11/e16309> DOI: 10.2196/16309.
11. Alexa, S.V. Metrics and tools for evaluating the effectiveness of introducing a mobile application to the market. *Management sciences in the modern world*. 2017; 1: 48–61. (In Russ)
12. Sigg, Stephan & Lagerspetz, Emil & Peltonen, Ella & Nurmi, Petteri & Tarkoma, Sasu. Sovereignty of the Apps: There's more to Relevance than Downloads. 2016.
13. Sigg, Stephan & Lagerspetz, Emil & Peltonen, Ella & Nurmi, Petteri & Tarkoma, Sasu. (2019). Exploiting Usage to Predict Instantaneous App Popularity: Trend Filters and Retention Rates. *ACM Transactions on the Web*. 13. 1–25. 10.1145/3199677.
14. Goncharova E. Monetization Strategies in Free-To-Play Mobile Games: Case: From The Bench. 2017. (In Russ)
15. Cherepanov E.V. Mobile Application Efficiency. *BBK 60 P27*. – 2016; 80. (In Russ)
16. Areskoug R. Applying Lean Analytics to Performance Metrics in M&A Earnouts. 2018.
17. Islam Rashedul & Mazumder, Tridib. Mobile application and its global impact. *International Journal of Engineering & Technology*. 2010; 10: 72–78.
18. Rulkov V. S. Marketing strategy for launching a mobile application on the market based on the freemium model. *Professional of the Year 2019*. 2019; 28–34. (In Russ)
19. Cohen E. L. What makes good games go viral? The role of technology use, efficacy, emotion and enjoyment in players' decision to share a prosocial digital game. *Computers in Human Behavior*, 2015; 33: 321– 329.
20. Pluzhnik E. V., Nikulchev E. V. Virtual laboratories in cloud infrastructure of educational institutions // 2nd International Conference on Emission Electronics (ICEE). Selected papers; 2015; 67–69. (In Russ)

Сведения об авторах:

Мифтахова Альбина Ирековна, студент; miftakhovaalбина@gmail.com

Янгиров Эмиль Илдарович, студент; emilyangirov@gmail.com

Карасева Екатерина Ивановна, кандидат экономических наук, доцент; eikaraseva@itmo.ru,

Янгиров Адиль Илдарович, начальник сектора функциональных испытаний инженерно-технических средств защиты отдела технических экспертиз и функциональных испытаний; adil-yan@yandex.ru

Никулина Екатерина Юрьевна, кандидат технических наук, доцент, кафедра автоматизированных информационных систем ОВД; 5nikeu@mail.ru

Information about the authors:

Albina I. Miftahova, Student; miftakhovaalбина@gmail.com

Emil I. Yangirov, Student; emilyangirov@gmail.com

Ekaterina I. Karaseva, Cand. Sci. (Econom), Assoc. Prof.; eikaraseva@itmo.ru

Adil I. Yangirov, Head of the sector of functional testing of engineering and technical means of protection of the department of technical expertise and functional tests; adil-yan@yandex.ru

Ekaterina Yu. Nikulina, Cand. Sci. (Eng), Assoc. Prof., Department of Automated Information Systems of the Department of Internal Affairs; nikeu@mail.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/ Received 30.10.2022.

Одобрена после рецензирования / Reviced 14.11.2022.

Принята в печать /Accepted for publication 14.11.2022.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 624

DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-4-142-151

Оригинальная статья /Original Paper

**Напряженно-деформированное состояние металлодеревянного
ригеля двухшарнирных рам**

А.И. Булгаков, М.Х. Калиева, М.О. Конусов

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

Резюме. Цель. Целью исследования является выбор оптимального конструктивного решения в проектировании двухшарнирных деревянных рам с металлодеревянным ригелем. **Метод.** Исследование основано на сравнительном анализе напряженно-деформированного состояния металлодеревянного ригеля в виде балок различного очертания, определенного по результатам теоретических исследований и численного эксперимента, выполненного в вычислительном комплексе ПК «ЛИРА». **Результат.** Предложены оптимальные конструктивные решения металлодеревянных ригелей двухшарнирных рам в виде армированных балок различного очертания. **Вывод.** Несущая способность двухшарнирных рам с ригелем в виде армированных клеелесных балок в среднем на 35 - 38% больше, чем несущая способность с ригелем в виде неармированных клеелесных балок. Применение металлодеревянных (армированных) балок позволяет оптимизировать сечение, уменьшив высоту сечения, тем самым сэкономить на материале древесины до 40%.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, несущая способность, двухшарнирная рама, металлодеревянный ригель, дощатоклеенная армированная балка, симметричное и несимметричное армирование, оптимальное конструктивное решение

Для цитирования: А.И. Булгаков, М.Х. Калиева, М.О. Конусов. Напряженно-деформированное состояние металлодеревянного ригеля двухшарнирных рам. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022; 49(4):142-151. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-4-142-151

Stress-strain state of metal-wood crossbar of double-hinged frames

A.I. Bulgakov, M.H. Kalieva, M.O. Konusov

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

Abstract. Objective the purpose of these studies is to choose the optimal design solution in the design of double-hinged wooden frames with a metal-wood crossbar, based on a comparative analysis of the stress-strain state of a metal-wood crossbar in the form of beams of various shapes, determined by the results of theoretical studies and numerical experiment. **Method.** Determination of the stress-strain state of metal-wood beams using theoretical studies and numerical experiment performed in the computer complex PC "LIRA". **Result.** Optimal design solutions of metal-wood crossbars of double-hinged frames in the form of reinforced beams of various shapes are proposed. **Conclusion.** The bearing capacity of double-hinged frames with a crossbar in the form of reinforced glued wood beams is on average 35 - 38% higher than the load bearing capacity with a crossbar in the form of unreinforced glued wood beams. The use of metal-wood (reinforced) beams makes it possible to optimize the cross-section by reducing the cross-section height, thereby saving up to 40% on wood material.

Keywords: stress-strain state, load-bearing capacity, double-hinged frame, metal-wood crossbar, board-glued reinforced beam, symmetrical and asymmetrical reinforcement, optimal design solution

For citation: A.I. Bulgakov, M.H. Kalieva, M.O. Konusov. Stress-strain state of metal-wood

crossbar of double-hinged frames. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science. 2022; 49(4):142-151. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-4-142-151

Введение. Двухшарнирные клеедеревянные рамы состоят из трех конструктивных элементов – двух вертикальных стоек и горизонтального ригеля. Основное достоинство таких рам – относительная простота изготовления и транспортирования прямых стоек и балочных конструкций. Горизонтальные ригели, кроме того, удобны для крепления к ним подвесного потолка (необходимого в некоторых случаях). Недостатком двухшарнирных рам является большая трудоемкость сборки и зависимость усилий в их элементах от возможных осадок опор. Двухшарнирная клеедеревянная рама с жесткими опорными узлами может иметь две клеедеревянные стойки постоянного, переменного или ступенчатого сечения. Наиболее экономичны стойки переменного сечения, так как в опорном сечении, где действуют максимальные моменты, они имеют максимальную высоту [1-5]. Стойки постоянного сечения проще в их изготовлении, зато стойки ступенчатой формы позволяют опирать на их ступени клеедеревянные балки мостовых кранов небольшой грузоподъемности. Ригель такой рамы может представлять собой: клеедеревянную двускатную балку; арку с затяжкой; сегментную или треугольную клеедеревянную ферму, шарнирно опирающуюся на стойки. Не представляет затруднений решение шарнирных узлов опирания таких конструкций на стойки. Основной же недостаток этой рамы – относительно большая сложность жестких опорных узлов стоек, чем шарнирных. Двухшарнирная клеедеревянная рама с шарнирными узлами может иметь две стойки постоянного или переменного клеедеревянного сечения (с наименьшей высотой в опорных узлах, где нет изгибающих моментов). Ригелем для этой рамы могут служить клеедеревянная, деревянная двускатная балка или пятиугольная ферма.

Постановка задачи. Ускоренные темпы развития строительства требуют новых и совершенствования существующих конструктивных форм, которые бы отвечали требованиям экономичности и индустриализации. Необходимость и целесообразность использования деревянных конструкций, как наиболее экологических и обладающих высокими конструктивными свойствами, позволяют расширить область их применения и повысить конкурентоспособность [11,12,18,19]. Недостатки древесины (зависимость ее свойств от строения, влияние пороков, ползучесть и т.д.) ограничивают область применения и требуют значительного расхода качественных пиломатериалов. Одним из способов устранения отрицательных свойств древесины является армирование деревянных конструкций [6,7,9,10].

Технико-экономические показатели свидетельствуют, что применение армированных деревянных конструкций по сравнению с неармированными сокращает приведенные затраты на 20-25 %, расход древесины в 1,8-2,1 раза, массу конструкций на 20-30 %, уменьшаются размеры поперечного сечения. Отмеченные факторы снижают трудоемкость изготовления, объем здания и, следовательно, затраты на ограждающие конструкции и отопление. Уменьшение габаритов и массы конструкций дает возможность более эффективно решать вопросы хранения, транспортировки и монтажа [13,14,20,22,24].

Прогресс в развитии современных деревянных (прежде всего клееных) конструкций проявляется в:

- повышении качества и производительности труда за счет заводского изготовления конструкций и использования сборных элементов на монтаже;
- стандартизации конструкций, требований к ним и методики оценки их качества;
- унификации, позволяющей использовать одни и те же изделия, элементы и детали, а также одинаковые технологические процессы для получения более широкой номенклатуры конструкций;
- использовании элементов большой длины и большого поперечного сечения, существенно превышающих размеры стандартных лесоматериалов; это позволяет перекрывать пролеты значительной величины (до 80-100 м) конструкциями

сравнительно небольшой массы;

- внедрение конструкций на основе листовых материалов и использовании конструкций рациональных форм и сечений;
- применении в сочетании с древесиной других конструкционных материалов (металлов, пластмасс);
- увеличении надежности, огнестойкости и долговечности конструкций за счет усовершенствования технологии и методов контроля, а также за счет повышения био- и огнестойкости древесины;
- рациональном использовании отходов лесоматериалов и низкосортной древесины.

В свете выше сказанного имеется перспектива применения клеедеревянных армированных конструкций и основной задачей является найти решения усовершенствования этих конструкций: оптимизация, повышение несущей способности, жесткости долговечности [15,16,17,25].

Методы исследования. В исследованиях рассматривается двухшарнирная клеедеревянная рама с жесткими опорными узлами и шарнирно опертым ригелем, представляющим собой клеедеревянную армированную балку. Материалом для изготовления балок принята древесина – сосна 2 сорта, для армирования – стержневая арматура А400 (ГОСТ 5781-82) периодического профиля. Для склеивания древесины с металлами предлагается использовать модифицированные эпоксидные, каучуковые, полиуретановые, фенольные клеи. Клеедеревянную балку рассчитываем, как балку, лежащую на двух шарнирных опорах, нагруженную равномерно-распределенной нагрузкой (рис.1).

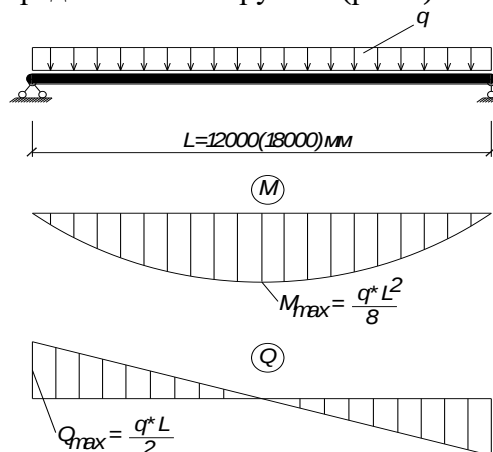


Рис.1. Расчетная схема балки
Fig.1. Calculation scheme of the beam

Рассмотрены следующие варианты неармированных и армированных балок:

1. Дощатокленная балка постоянного по длине сечения, пролетами $L=12$ метров (рис.2) и $L=18$ метров;
2. Армированная дощатокленная балка постоянного по длине сечения, пролетами $L=12$ метров (рис.2) и $L=18$ метров;
3. Двускатная дощатокленная балка, пролетами $L=12$ метров (рис.3) и $L=18$ метров;
4. Двускатная армированная дощатокленная балка, пролетами $L=12$ метров (рис.3) и $L=18$ метров;
5. Двускатная дощатокленная балка сегментного очертания, пролетами $L=12$ метров (рис.4) и $L=18$ метров;
6. Двускатная армированная дощатокленная балка сегментного очертания, пролетами $L=12$ метров (рис.4) и $L=18$ метров.

Кроме того, изучены прямоугольное и двутавровое сечения клеедеревянных балок.

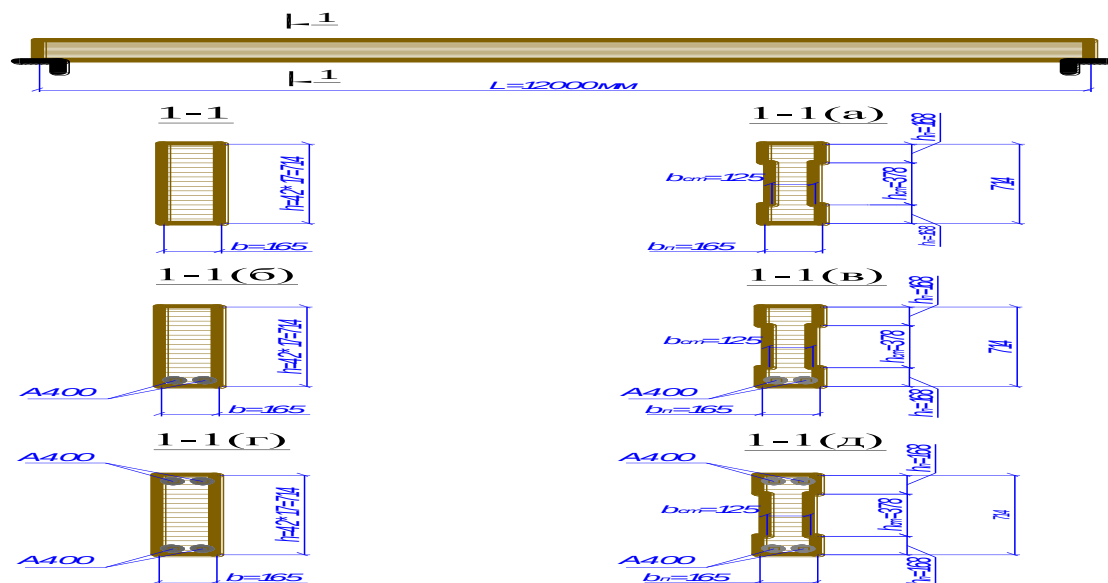


Рис.2. Клеедеревянная балка постоянного по длине сечения

Fig.2. Slabs Glue-wood beam capacity of constant cross-section along the maximum length

сечение 1-1 - неармированная балка прямоугольного сечения; сечение 1-1а - неармированная балка двутаврового сечения; сечение 1-1б - армированная балка прямоугольного сечения, несимметричное армирование; сечение 1-1в - армированная балка двутаврового сечения несимметричное армирование; сечение 1-1 г - армированная балка с прямоугольным сечением, симметричное армирование; сечение 1-1д - армированная балка двутаврового сечения, симметричное армирование.

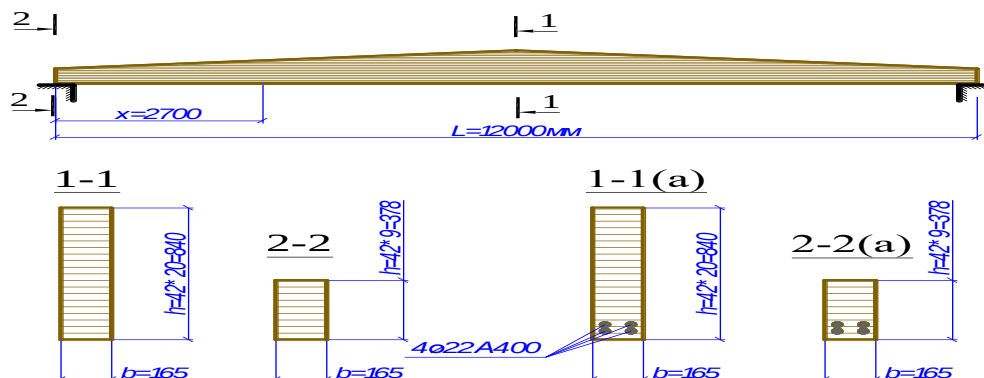


Рис.3. Двускатная дощатокленная балка

Fig. 3. Gable plank beam

сечение 1-1 – сечение в коньке неармированной балки; сечение 2-2 – приопорное сечение неармированной балки; сечение 1-1 а - сечение в коньке неармированной балки; сечение 2-2 а - приопорное сечение неармированной балки.

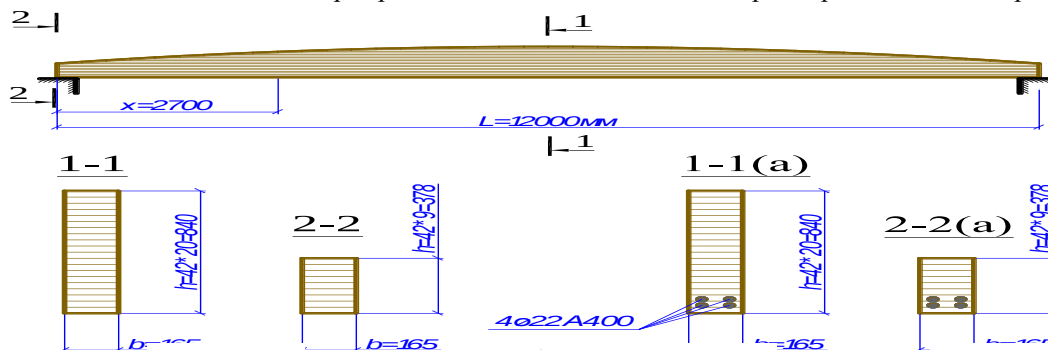


Рис.4. Двускатная дощатокленная балка сегментного очертания верхнего пояса

Fig.4. Double-pitched wooden beam with a segmental shape of the upper chord

сечение 1-1 – сечение в коньке неармированной балки; сечение 2-2 – приопорное сечение неармированной балки; сечение 1-1 а - сечение в коньке неармированной балки; сечение 2-2 а - приопорное сечение неармированной балки.

Расчет ведем по двум группам предельных состояний. Проверка прочности балки на действие нормальных напряжений по формуле [3]:

$$\sigma = \frac{M}{W} \leq R_{и} \cdot m_6 / \gamma_n$$

где M – расчётный изгибающий момент; R – расчетное сопротивление древесины изгибу; m_6 – коэффициент для клееных сжатых, изгибаемых и сжато-изгибаемых элементов; γ_n – коэффициент условия работы по назначению.

Проверка прочности балки на действие касательных напряжений по формуле [3]:

$$\tau = \frac{Q \cdot S}{I \cdot b} \leq R_{ск} / \gamma_n ,$$

где $R_{ск}$ – расчетное сопротивление древесины скалыванию.

Проверка устойчивости плоской формы деформирования выполняют по формуле [3]:

$$\sigma = \frac{M}{W \cdot \varphi_m} \leq R_{и} \cdot m_6 / \gamma_n$$

φ_m – коэффициент устойчивости, определяемый по формуле:

$$\varphi_m = 140 \frac{b^2}{L_0 \cdot h} \cdot \kappa_\phi$$

где L_0 – расстояние между опорами элемента или закрепленными точками по сжатой кромке, препятствующими смещению элемента из плоскости изгиба; κ_ϕ – коэффициент, зависящий от формы эпюры изгибающих моментов на участке L_0 .

Проверка прогибов: Прогиб балки от равномерной распределенной нагрузки определяем по формуле:

$$f = \frac{5 \cdot q^n \cdot L^4}{384 \cdot E_{др} \cdot I \cdot \gamma_n} \left[1 + c \left(\frac{h}{L} \right)^2 \right] \leq f_{пр} ,$$

где $c = 15,4 + 3,8 \cdot \beta$ – коэффициент, учитывающий влияние деформаций сдвига на прогиб элемента; $f_{пр} = L/300$ – предельный прогиб для клееных балок; $E_{др}$ – модуль упругости древесины.

Обсуждение результатов. При расчете армированных балок использовались приведенные геометрические характеристики сечений [3]. По результатам теоретических расчетов можно сделать следующие выводы:

1. При сравнении результатов расчетов неармированной клеелесеревянной балки постоянно по длине прямоугольного сечения с неармированной балкой постоянного по длине двутаврового сечения можно сделать следующие выводы: в балке двутаврового сечения нормальные напряжения незначительно больше (4%), когда как касательные напряжения выросли на 3%, жесткость балки уменьшилась на 3%; при сохранении требуемой несущей способности применение балки двутаврового сечения позволяет сэкономить 13-15 % древесины.
2. Сравнение клеелесеревянных неармированных балок и армированных клеелесеревянных балок показало, что нормальные напряжения и прогибы снизились, что, соответственно, повысило их несущую способность.
3. В клеелесеревянной балке постоянного по длине прямоугольного сечения с несимметричным армированием напряжения и прогибы уменьшились: нормальные напряжения на 36%; прогибы на 30%.
4. В клеелесеревянной балке постоянного по длине прямоугольного сечения с симметричным армированием напряжения и прогибы уменьшились: нормальные напряжения на 40%; прогибы на 37%.
5. В клеелесеревянной балке постоянного по длине двутаврового сечения с несимметричным армированием напряжения и прогибы уменьшились: нормальные напряжения на 37%; прогибы на 33%.

6. В клеедеревянной балке постоянного по длине двутаврового сечения с симметричным армированием напряжения и прогибы уменьшились: нормальные напряжения на 40%; прогибы на 34%.
7. В двускатной клеедеревянной балке с армированием напряжения и прогибы уменьшились: нормальные напряжения на 40%; прогибы на 25%.
8. В двускатной клеедеревянной балке сегментного очертания с армированием напряжения и прогибы уменьшились: нормальные напряжения на 37%; прогибы на 25%.
9. Сравнение результатов расчетов двускатных балок, в балке сегментного очертания нормальные напряжения в расчетном сечении меньше на 36%, таким образом несущая способность балки с криволинейным очертанием больше чем в двускатной трапецевидной балке.
10. Прочность на действие касательных напряжений и устойчивость плоской формы деформирования менялись незначительно.

Численный эксперимент по исследованию несущей способности клеедеревянных неармированных и клеедеревянных армированных балок проводился с помощью вычислительного комплекса ПК ЛИРА-САПР 2020. Целью численного эксперимента являлось изучение устройств или физических процессов с помощью математического моделирования. В вычислительном комплексе были построены математические модели конструкций неармированных и армированных клеедеревянных балок тех же размеров, что и при теоретических расчетах. Заданы физико-механические и упругие характеристики материалов исследуемых конструкций. Построена расчетная схема и собрано нагружение балок (рис.5).

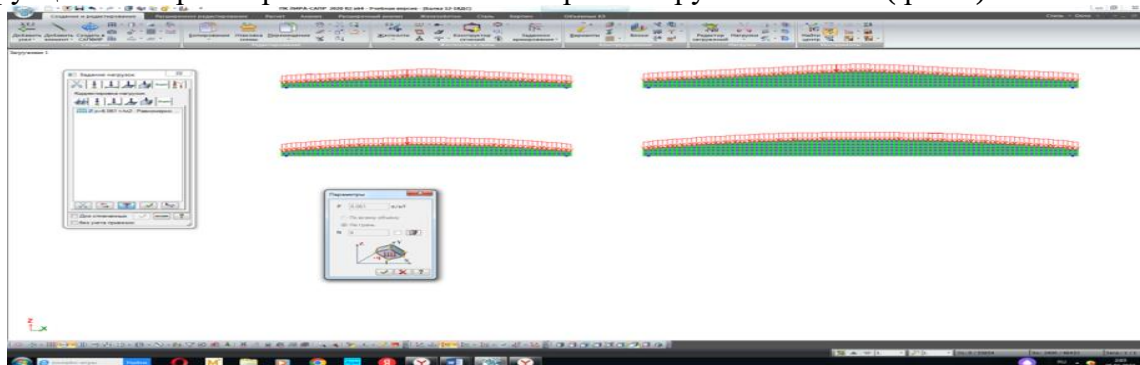


Рис.5. Загружение двускатных балок, $L=12$ м и $L=18$ м

Fig.5. Loading of gable beams, $L=12$ m and $L=18$ m

Численное исследование модели дает возможность определять разнообразные характеристики процессов, оптимизировать конструкции. Мозаика напряжений двускатных балок наглядно показывает распределение напряжений по длине и сечению исследуемой конструкции (рис.6,7,8).

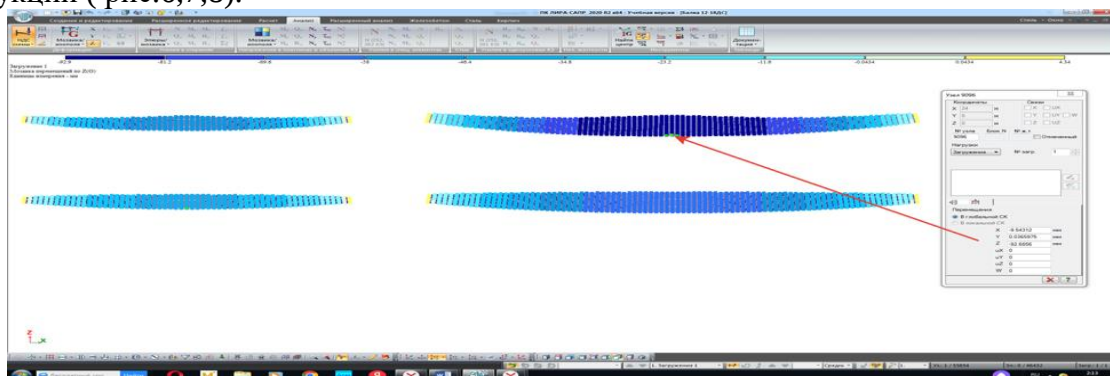


Рис.6. Мозаика перемещений (прогибов) в двускатных балках

Fig.6. Mosaic of displacements (deflections) in gable beams

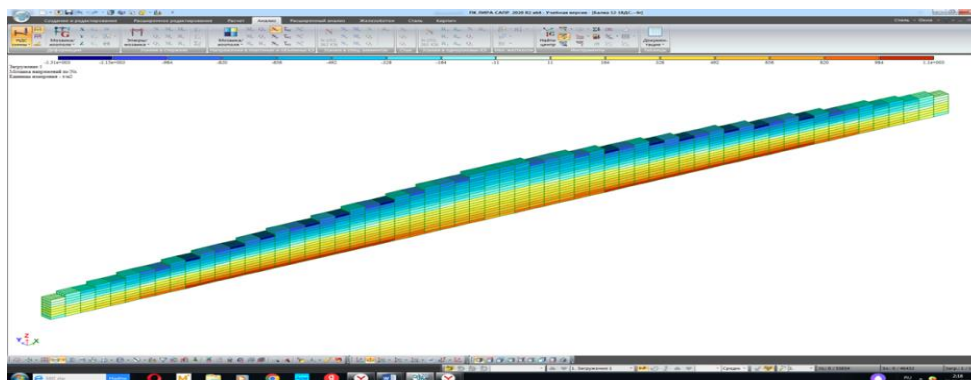


Рис.7. Мозаика нормальных напряжений по N_x двускатных неармированных балок, $L=12\text{м}$
 Fig.7. Mosaic of normal stresses on N_x gable unreinforced beams, $L=12\text{m}$

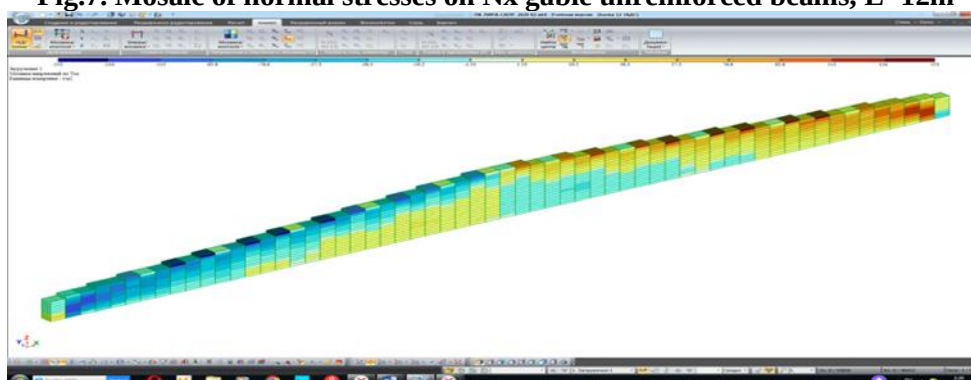


Рис.8. Мозаика касательных напряжений по T_{xz} двускатных неармированных балок, $L=12$
 Fig.8. Mosaic of tangential stresses along T_{xz} of gable unreinforced beams, $L=12$

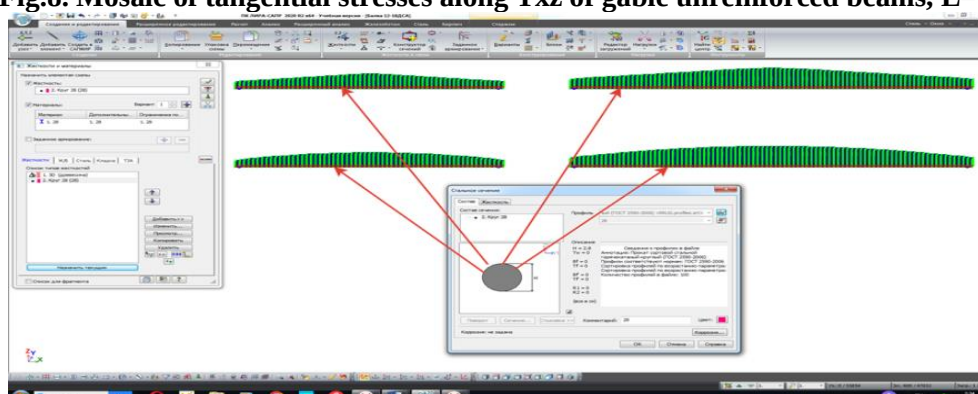


Рис.9. Несимметричное (в один ряд) армирование двускатных балок
 Fig.9. Asymmetric (in one row) reinforcement of gable beams

В армированных балках можно наблюдать снижение прогибов, уменьшение нормальных напряжений и незначительное изменение сдвигающих (касательных) напряжений (рис. 10,11,12).

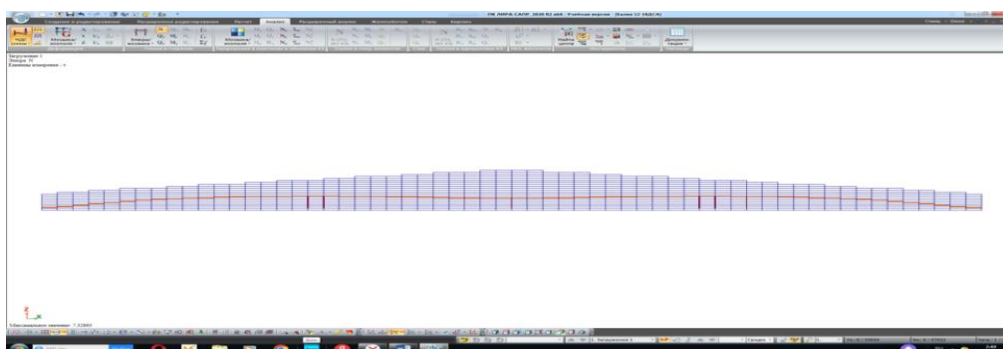


Рис.10. Эпюра нормальных напряжений низкосортной армированной двускатной балки
 Fig.10. Diagram of normal stresses of a low-grade reinforced gable beam

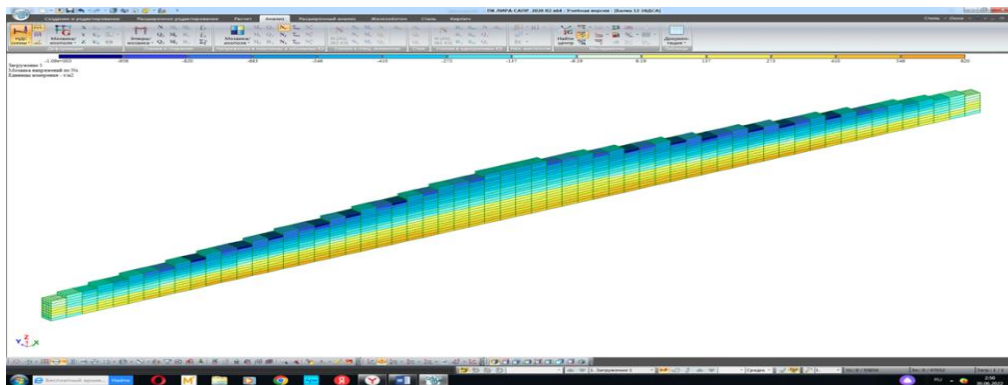


Рис.11. Мозаика нормальных напряжений по N_x двускатных армированных балок, $L=12$ м

Fig.11. Mosaic of normal stresses along N_x gable reinforced beams, $L=12$ m

Результаты численного эксперимента (рис. 6-12) и теоретических исследований показали большую сходимость.

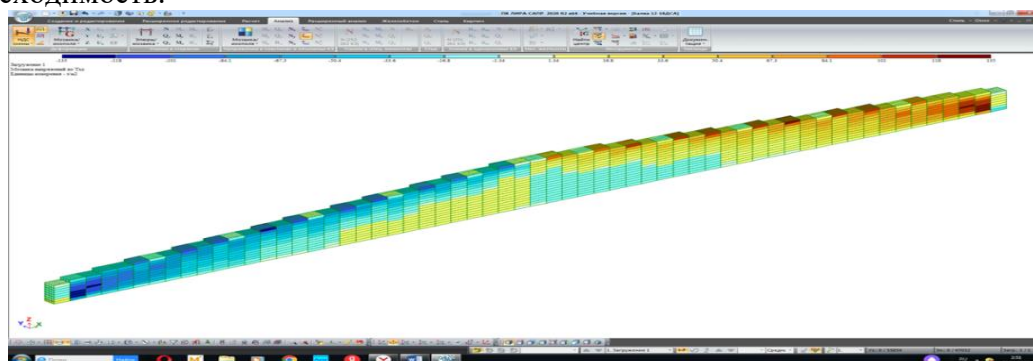


Рис.12. Мозаика касательных напряжений по T_{xz} двускатных армированных балок, $L=12$ м

Fig.12. Mosaic of shear stresses along T_{xz} of gable reinforced beams, $L=12$ m

Вывод. Полученные результаты теоретических расчетов и численного эксперимента разнятся не более чем на 8-10 %. Несущая способность двухшармированных рам с ригелем в виде армированных клеедеревянных балок в среднем на 35 - 38% больше, чем несущая способность с ригелем в виде неармированных клеедеревянных балок.

Применение металлодеревянных (армированных) балок позволяет оптимизировать сечение, уменьшив высоту сечения, тем самым сэкономить на материале древесины до 40%.

Несущую способность клеедеревянной балки путем армирования можно повысить на: 38 - 40% - симметричным армированием постоянной по длине балки прямоугольного и двутаврового сечения; 30 - 35% - несимметричным армированием постоянной по длине балки прямоугольного и двутаврового сечения; 30 - 35% - армированием двускатной балки.

Жесткость в армированных клеедеревянных балках можно повысить на: 35 - 37% - симметричным армированием постоянной по длине балки прямоугольного и двутаврового сечения; 33 - 35% - несимметричным армированием постоянной по длине балки прямоугольного и двутаврового сечения; 35 - 40% - армированием двускатной балки.

Библиографический список:

- ГОСТ 8486-86. Пиломатериалы хвойных пород. - М. : Изд-во стандартов, 1990.-30 с.
- ГОСТ 5781-82*. Сталь горячекатаная для армированных железобетонных конструкций. - М. : Изд-во стандартов, 1983.
- Гринь, И. М. Проектирование и расчет деревянных конструкций: справочник / И. М. Гринь. - Липецк : Интеграл, 2006. - 236 с.
- Касаткин, В. Б. Эффективность применения армированной древесины для изготовления панельных покрытий / В. Б. Касаткин, Ю. Б. Вылег- жанин // Развитие производства клееных деревянных конструкций в Сибири : сб. тр. - Новосибирск : Новосиб. строит, ин-т, 1975. - С. 120 - 123.
- Ковальчук, Л. М. Производство деревянных клееных конструкций / Л. М. Ковальчук. - М. : Стройматериалы, 2005. - 334 с.
- Ковальчук, Л. М. Деревянные конструкции в строительстве / Л. М. Ковальчук, С. Б. Турковский - М. : Стройиздат, 1995. - 246 с.
- Линьков, Н. М. Особенности деформирования клееных армированных деревянных балок при циклическом действии

- длительной нагрузки / Н. М. Линьков, С. А. Щуко // Строительство и архитектура. - 1972. - № 11. - С. 39-41.
8. Линьков, Н. М. Снижение материалоемкости конструкций / Н. М. Линьков. - М. : Стройиздат, 1974. - 48 с.
 9. Пособие по проектированию деревянных конструкций. - М. : Стройиздат, 1986. - 216 с.
 10. Конструкции из дерева и пластмасс: Учебное пособие для студентов ВУЗов/ Г.Н.Зубарев, Ф.А.Бойтемиров, В.М.Головина и др./Под ред. Ю.Н. Хромца. -3-изд., перераб. И доп.-М.:Издательский центр «Академия», 2004-304 с.
 11. Рощина, С. И. Повышение надежности армированных деревянных конструкций /С. И. Рощина, В. А. Репин, М. В. Луккин // Деревообрабатывающая промышленность. - 2008. - № 2. - С. 11-13.
 12. Рощина, С. И. Армированные деревянные конструкции / С. И. Рощина // Строительство и архитектура. - 2008. - № 3. - С. 32-38.
 13. Рощина, С. И. Плиты покрытия с армированным деревянным каркасом при длительных силовых воздействиях / С. И. Рощина // Промышленное и гражданское строительство. - 2008. - № 4. - С. 42-43.
 14. Сороткин, В. М. О прочности и деформативности клеевого соединения арматуры с древесиной / В. М. Сороткин, А. Б. Шолохова, А. С. Фрейдин // Разработка и исследование клееных деревянных и фанерных армированных конструкций : тр. ЦНИИСК. - Вып. 24. - М., 1972. - С. 40-46.
 15. СНиП П-25-80*. Деревянные конструкции. Нормы проектирования. - М. : Стройиздат, 1982.
 16. Смирнов, А. Ф. Сопротивление материалов / А. Ф. Смирнов. - М. : Высш. шк., 1975. - С. 82.
 17. Щуко, В. Ю. Исследования несущей способности армированных деревянных балок / В. Ю. Щуко // Строительство и архитектура. - 1969. - № 2. - С. 22-28.
 18. Щуко, С. А. Технико-экономическая оценка эффективности клееных армированных деревянных конструкций / С. А. Щуко, А. Н. Козулин // Строительство и архитектура. - 1972. - № 11. - С. 124-126.
 19. Щуко, В. Ю. Оптимальное проектирование армированных деревянных конструкций / В. Ю. Щуко, С. Л. Молотовщиков, С. И. Рощина // Расчет и оптимальное проектирование строительных конструкций : материалы междунар. симп. - Владимир : ВлГУ, 1996. - С. 26-29.
 20. Щуко, В. Ю. Армированные деревянные конструкции: учеб. пособие / В. Ю. Щуко, С. И. Рощина. - Владимир : Посад, 2002. - С. 67.
 21. Щуко, В. Ю. Армированные деревянные балки для покрытий и перекрытий жилых зданий / В. Ю. Щуко, Е. А. Смирнов, С. В. Климов // Развитие малоэтажного домостроения из древесного сырья : материалы Всесоюз. совещ. журналистов. - М., 1989. - С. 40-45.
 22. Щуко, В. Ю. Оценка работы армированных деревянных балок во времени / В. Ю. Щуко // Строительство и архитектура. - 1969. - № 7. - С. 28-31.
 23. Белянкин Ф.П. Длительное сопротивление древесины. М.: ОНТИ, 1934. 280.
 24. Иванов Ю.М., Линьков И.М., Сороткин В.М. Исследование влияния армирования на прочность и жесткость клееных деревянных изгибаемых элементов //Разработка и исследование клееных и фанерных армированных конструкций: тр. УНИИАС. Вып. 24. М., 1972. С. 13-39.
 25. Репин В.А. Деревянные балки с рациональным армированием: дис. ... канд. техн. наук. Владимир, 2000. 158 с.

References:

1. GOST 8486-86. Softwood lumber. М. : Publishing House of Standards, 1990:30.
2. GOST 5781-82*. Hot-rolled steel for reinforced reinforced concrete structures. М. : Publishing House of Standards, 1983.
3. Grin, I. M. Design and calculation of wooden structures: handbook. Lipetsk : Integral, 2006: 236.
4. Kasatkin, V. B. The effectiveness of the use of reinforced wood for the manufacture of panel coverings / V. B. Kasatkin, Yu. B. Vyleg-zhanin . Development of the production of glued wooden structures in Siberia : sb. tr. - Novosibirsk : Novosibirsk. builds, in-t, 1975: 120-123.
5. Kovalchuk, L. M. Production of wooden glued structures. М. : Building Materials, 2005: 334.
6. Kovalchuk, L. M. Wooden structures in construction / L. M. Kovalchuk, S. B. Turkovsky. М. : Stroyizdat, 1995: 246
7. Linkov, N. M. Features of deformation of glued reinforced wooden beams under the cyclic action of prolonged load / N. M. Linkov, S. A. Shchuko. *Construction and architecture*. 1972; 11: 39-41.
8. Linkov, N. M. Reduction of material consumption of structures. М. : Stroyizdat, 1974; 48.
9. Пособие по проектированию деревянных конструкций. М. : Стройиздат, 1986.-216 с.
10. Constructions made of wood and plastics:Textbook for university students / G.N.Zubarev, F.A.Boytemirov, V.M.Golovina, etc./Edited by Yu.N. Khromets. -3rd ed., reprint. And additional-M.: Publishing center" Academy", 2004-304 p.
11. Рощина, С. И. Повышение надежности армированных деревянных конструкций /С. И. Рощина, В. А. Репин, М. В. Луккин // Деревообрабатывающая промышленность. - 2008. - № 2. - С. 11-13.
12. Roschina, S. I. Reinforced wooden structures / S. I. Roschina // Construction and architecture. - 2008. - No. 3. - pp. 32-38.
13. Roshchina, S. I. Coating plates with reinforced wooden frame under prolonged force influences / S. I. Roshchina // Industrial and civil construction. - 2008. - No. 4. - pp. 42-43.
14. Sorotokin, V. M. On the strength and deformability of the adhesive joint of reinforcement with wood / V. M. Sorotokin, A. B. Sholokhova, A. S. Frey-din // Development and research of glued wooden and plywood reinforced structures : tr. TSNIISK. - Vol. 24. - М., 1972. - p. 40-46.
15. СНиП П-25-80*. Деревянные конструкции. Нормы проектирования. - М. : Стройиздат, 1982.
16. Смирнов, А. Ф. Сопротивление материалов / А. Ф. Смирнов. - М. : Высш. шк., 1975. - С. 82.
17. Shchuko, V. Yu. Studies of the bearing capacity of reinforced wooden beams / V. Yu. Shchuko // Construction and architecture . - 1969. - No. 2. - pp. 22-28.
18. Shchuko, S. A. Technical and economic assessment of the effectiveness of glued reinforced wooden structures / S. A. Shchuko, A. N. Kozulin. *Construction and architecture*. 1972;11:124-126.
19. Shchuko, V. Yu. Optimal design of reinforced wooden structures / V. Yu. Shchuko, S. L. Molotovshchikov, S. I.

- Roshchina. Calculation and optimal design of building structures : materials international. simp. -Vladimir : VLSU, 1996: 26-29.
20. Shchuko, V. Yu. Reinforced wooden structures: textbook. manual / V. Yu. Shchuko, S. I. Roshchina. - Vladimir : Posad, 2002: 67.
21. Shchuko, V. Yu., E. A. Smirnov, S. V. Klimkov. Reinforced wooden beams for coverings and ceilings of residential buildings *Development of low-rise housing construction from wood raw materials : materials of the All-Union. confer. journalists.* M., 1989: 40 - 45.
22. Shchuko, V. Yu. Evaluation of the work of reinforced wooden beams in time. *Construction and architecture.* 1969; 7: 28 - 31.
23. Belyankin F.P. Long-term resistance of wood. M.: балок ONTI, 1934. 280.
24. Ivanov Yu.M., Linkov I.M., Sorokin V.M. Investigation of the effect of reinforcement on the strength and rigidity of glued wooden bent elements. *Development and research of glued and plywood reinforced structures: tr. UNIIAS.* 1972.; 24: 13-39.
25. Repin V.A. Wooden beams with rational reinforcement: dis. ... Candidate of Technical Sciences. Vladimir, 2000; 158.

Сведения об авторах:

Булгаков Александр Исакович, доцент, кафедра строительных конструкций и гидротехнических сооружений; alexbild_58@mail.ru

Калиева Мадина Халитовна, старший преподаватель, кафедра строительных конструкций и гидротехнических сооружений; anidama@mail.ru

Конусов Марат Олегович, студент 4 курса; m.konusov99@mail.ru

Information about the authors:

Alexander I. Bulgakov, Assoc. Prof., Department of Building Structures and Hydraulic Structures; alexbild_58@mail.ru

Madina Kh. Kalieva, Senior Lecturer, Department of Building Structures and Hydraulic Structures; anidama@mail.ru

Marat O. Konusov, 4th year Student; m.konusov99@mail.ru

Конфликт интересов/ Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 26.10.2022.

Одобрена после/рецензирования Revised 03.11.2022.

Принята в печать/ Accepted for publication 03.11.2022.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 624.044

DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-4-152-161

Оригинальная статья / Original Paper

**Особенности учета геометрической и физической нелинейностей
в большепролетных мембранно-пневматических системах**

А.Ю. Ким, С.В. Полников, М.Ф. Амоян

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.,
410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является обоснование необходимости учета геометрической и физической нелинейностей в большепролетных мембранно-пневматических системах. **Метод.** Исследование основано на применении метода вариации параметра; метода последовательных нагружений; итерационного метода приращений параметров с применением численной процедуры Эйлера-Коши третьего или методом Рунге-Кутты более высокого порядка точности. **Результат.** Установлено, что геометрическая нелинейность может быть от 5 до 10%, если в сооружении маленький или средний пролет, и нагрузка на сооружение не очень большая, особенно если речь об участковой нагрузке. Если же пролет сооружения составляет 120-150 метров, а нагрузка и прогибы достаточно большие, то геометрическая нелинейность может составлять 20% и более процентов. Выявлено, что физическая нелинейность, которая нами учтена стандартной процедурой Эйлера-Коши третьего порядка точности, при большом пролете сооружения и большой величины нагрузки составляет примерно 13-21%, а часть физической нелинейности воздуха, закаченного между герметичных мембран сооружения, определена с помощью усовершенствованной формулы Эйлера-Коши при числе итераций 20-25, т.е. «последствие», по результатам исследования составляет от 2-7%. **Вывод.** Сооружение, состоящее из легких металлических конструкций, можно возвести в течение нескольких месяцев на готовый свайный или ленточный фундамент. Такие сооружения легко выдерживают многие виды динамической нагрузки, а именно ветровую, сейсмическую, вибрационную и на треть дешевле, чем здания из традиционных материалов.

Ключевые слова: нелинейная строительная механика, шаговые методы решения задач, расчет сооружения с учетом геометрической и физической нелинейности, итерационный метод Эйлера – Коши третьего порядка точности

Для цитирования: А.Ю. Ким, С.В. Полников, М.Ф. Амоян. Особенности учета геометрической и физической нелинейностей в большепролетных мембранно-пневматических системах. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022; 49(4):152-161. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-4-152-161

Features of Accounting for Geometric and Physical Nonlinearities in Long-Span Pneumatic Membrane Systems

A.Yu. Kim, S.V. Polnikov, M.F. Amoyan

Yu.A. Gagarin Saratov State Technical University,
77 Politekhnikeskaya Str., Saratov 410054, Russia

Abstract. Objective. The purpose of the study is to substantiate the need to take into account the geometric and physical nonlinearities in large-span membrane-pneumatic systems. **Method.** The study is based on the application of the parameter variation method; method of successive loadings; the iterative method of parameter increments using the third Euler-Cauchy numerical procedure or the Runge-Kutta method of a higher order of accuracy. **Result.** It has been established that the geometric non-linearity can be from 5 to 10% if the structure has a small or medium span, and the load on the structure is not very large, especially when it comes to section load. If the span of the structure is 120-

150 meters, and the load and deflections are large enough, then the geometric nonlinearity can be 20% or more. It was revealed that the physical nonlinearity, which we took into account by the standard Euler-Cauchy procedure of the third order of accuracy, with a large span of the structure and a large load is approximately 13-21%, and the part of the physical nonlinearity of the air pumped between the hermetic membranes of the structure is determined using an improved formula Euler-Cauchy with the number of iterations 20-25, i.e. "aftereffect", according to the results of the study, ranges from 2-7%. **Conclusion.** A structure consisting of light metal structures can be erected within a few months on a finished pile or strip foundation. Such structures can easily withstand many types of dynamic loads, namely wind, seismic, vibration, and are one-third cheaper than buildings made from traditional materials.

Keywords: non-linear building mechanics, step-by-step methods for solving problems, calculation of a structure taking into account geometric and physical nonlinearity, iterative Euler-Cauchy method of the third order of accuracy

For citation: A.Yu. Kim, S.V. Polnikov, M.F. Amoyan. Features of Accounting for Geometric and Physical Nonlinearities in Long-Span Pneumatic Membrane Systems. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2022; 49(4):152-161. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-4-152-161

Введение. Последние три десятилетия большепролетные мембранно-пневматические системы нашли широкое применение в гражданском строительстве многих стран. В постсоветское время в нашей стране стали активно возводиться большепролетные сооружения культурно-развлекательного и спортивного назначения (рис. 1).

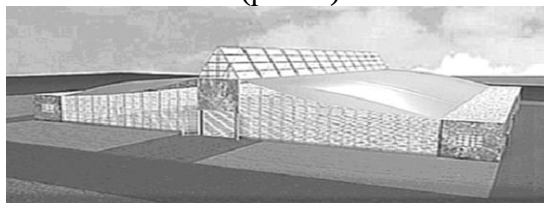


Рис.1. Большепролетное мембранно-пневматическое сооружение

Fig.1. Large-span membrane-pneumatic structure

В связи с ростом цены на все материалы, требованием экономии и максимального использования несущей способности таких систем стали разрабатываться усовершенствованные методы их расчета.

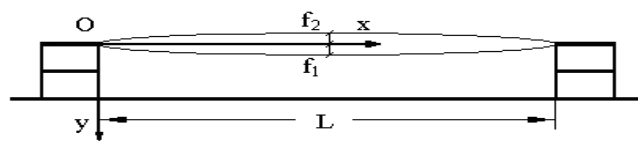


Рис.2. Расчетная схема мембранно-пневматической системы

Fig.2. Calculation scheme of the membrane-pneumatic system

Для таких мембранно-пневматических систем с применением металлических конструкций расчет по недеформированной схеме, предполагающей малые перемещения, становится невозможным. При расчете таких систем нужно отойти от расчета по методам линейной строительной механики и перейти к расчету по деформированной схеме, т. е. с учетом геометрической и физической нелинейности. [2- 4, 6, 16].

В некоторых сооружениях, если это пневматические сооружения, надо еще учитывать, физическую нелинейность работы воздуха и мембран, между которыми и закачан воздух. Также надо учитывать изменения расчетной схемы сооружения в процессе эксплуатации, т. е. конструктивную нелинейность, выражающуюся во включении или выключении связей во время чистки снега на покрытии мембранно-стержневого сооружения. Точный расчет нелинейных задач вызывает большие трудности, так как многие принципы линейной строительной механики не применимы для решения нелинейных задач [7,8,11-13]. Поэтому в шестидесятые годы в

нашей стране для расчета строительных конструкций стали активно применяться шаговые методы с помощью которых можно рассчитывать практически любые нелинейные сооружения.

Постановка задачи. Одним из часто применяемых методов является шаговый метод с применением численной процедуры Эйлера-Коши третьего порядка точности. Данный численный метод является итерационным и им очень удобно производить расчет пневматических нагрузок, действующих на линзообразные мембранно-пневматические сооружения. С помощью итераций удобно считать подкачку или утечку воздуха внутрь герметичных пневмолинз сооружения. При использовании стандартной численной процедуры Эйлера-Коши третьего порядка точности с числом итераций $C_k = 3$ учитывается только часть геометрической и физической нелинейности, которая возникает в процессе действия приложенных традиционных нагрузок. Но расчет при $C_k = 3$ не учитывает ту геометрическую и физическую нелинейность, которая наблюдается уже после приложения нагрузок при процессе дальнейшего перераспределения пневматических нагрузок, усилий и перемещений системы, и которая названа нами «последствием».

Система без учета последствия еще не находится в равновесном состоянии (хотя система уравнений метода перемещений МКЭ удовлетворена), так как остались не учтенными те приложенные к системе пневматические силы, действия которых не были учтены стандартной процедурой Эйлера-Коши. [7, 8]. Целью исследования является обоснование необходимости учета геометрической и физической нелинейностей в большепролетных мембранно-пневматических системах.

Методы исследования. Расчет пневматической системы с учетом последствия может быть произведен тем же итерационным методом приращений параметров с применением численной процедуры Эйлера-Коши третьего или методом Рунге-Кутты более высокого порядка точности. Это возможно благодаря тому, что численные процедуры Эйлера-Коши и Рунге-Кутта являются универсальными итерационными процедурами. Чтобы рассчитать процесс последствия нужно на том же шаге нагружения увеличить число итераций до той величины, которую легко определить, произведя расчет на ЭВМ. Совпадение величины избыточного давления на двух соседних итерациях до шести цифр после запятой свидетельствует о том, что процесс расчета последствия завершен. В этом случае накопленное избыточное давление воздуха в линзе будет полностью израсходовано на перемещения поясов линзы, и процесс дальнейшего движения мембран остановится и система придет в равновесие. [7, 8, 11- 13].

Рассмотрим теперь количественное влияние последствия давления воздуха на искомые результаты. Если учитывать последствие системы при действии внешних традиционных нагрузок, то есть силовых, кинематических и температурных нагрузок (но не пневматических), то ошибка в определении приращения избыточного давления воздуха, прогибов поясов, пневматических нагрузок на пояса и усилий в поясах линзы составляет примерно 10%. На основе анализа результатов расчета мембранно-пневматической системы было определено количественное отличие в искомых функциях. Функции были вычислены с учетом последствия в расчете системы, то есть с применением усовершенствованной автором численной процедуры Эйлера-Коши при числе итераций $C_k = 25$, и без учета последствия в расчете системы с применением известной численной процедуры Эйлера-Коши при числе итераций $C_k = 3$ и при одном шаге.

В данном исследовании мы рассматриваем один шаг с множеством итераций, и на каждой итерации корректируется величина нагрузки, так как считаем, что это самый простой способ решения данной задачи. Число итераций при этом назначается достаточно большим, чтобы адекватно описать процесс работы пневматической системы в его развитии и получить заданную точность результатов. В этом случае итерационная численная процедура Эйлера-Коши с длительной итерационной обработкой требует применения большого числа итераций, когда $s > 3$. Как будет показано далее, в этом случае учитывается явление последствия, которое сопровождается продолжением изменения избыточного давления воздуха в линзе, создавая внутреннюю пневматическую нагрузку, вынуждающую пневматическую систему к деформациям, пе-

пераспределению усилий в элементах и изменению давления в линзе.

Далее рассмотрим действие пневматической нагрузки на сооружение. В ряду нагрузок пневматическая нагрузка P занимает особое место. Она представляет собой подкачку воздуха в замкнутую полость линзы покрытия или утечку воздуха из линзы при нарушении режима эксплуатации сооружения или каких либо аварийных ситуациях. При больших пролетах последствие от прикладываемой пневматической нагрузки настолько существенно и так существенно изменяет искомые результаты, что для его расчета недостаточно применить стандартную итерационную численную процедуру Эйлера-Коши третьего порядка точности, поэтому приходится увеличивать число итераций до 20-25.

Исследование явления «последствия» показывает, что для точного учета последствия необходимо на каждой итерации применение формулы, корректирующей величину прикладываемой к системе внешней пневматической нагрузки по формуле, которая и есть в программе расчета сооружений с учетом нелинейных факторов:

$$P^{(c+1)} = P^{(c)} - \Delta P^{(c)}. \quad (1)$$

Здесь под P подразумевается пневматическая нагрузка, возникающая при накачке воздуха в пневматическую линзу или при утечке воздуха из линзы. Отметим, что по формуле (1) на текущей итерации производится корректировка пневматической нагрузки P , которая будет действовать на следующей итерации. Применяемое правило знаков: при увеличении давления в линзе приращение считается положительным, а при убывании - отрицательным. Если приращение пневматической нагрузки положительное, то в процессе последствия избыточное давление в линзе уменьшается. Но поскольку величина задаваемой пневматической нагрузки P на каждой итерации должна быть величиной постоянной и равной заданной проектировщиком величине пневматической нагрузки, то знак в корректирующей формуле (1) должен быть «минус». В этом случае нагрузка P возрастет на $\Delta P^{(c)}$, и чтобы быть равной заданной постоянной величине, она к началу следующей итерации должна быть равна $P^{(c+1)} = P + \Delta P^{(c)} = P - DP$.

Таким образом, численная процедура рассматриваемого варианта итерационного метода приращений параметров с поэтапным применением усовершенствованной численной процедуры Эйлера-Коши третьего порядка точности, будет включать в себя следующую последовательность операций:

1. Решение задачи в первом приближении, т.е. методом приращений первого порядка точности с применением формулы Эйлера:

$$\Delta Z_{nv}^{(1)} = \sum_{\mu=1}^{\mu=\mu} \Delta x_{n\mu} \cdot A'_{v\mu}(x_{n-1,\mu}, y_{n-1}).$$

2. Решение задачи в c -том приближении по формуле Эйлера -Коши:

$$\Delta Z_{nv}^{(c)} = \sum_{\mu=1}^{\mu=\mu} \Delta x_{n\mu} \cdot A'_{v\mu}\left(x_{n-1,\mu} + \frac{\Delta x_{n\mu}}{2}, y_{n-1} + \frac{\Delta y_n^{(c-1)}}{2}\right), \text{ где } 2 \leq c \leq C_k.$$

$$P^{(c+1)} = P^{(c)} - \Delta P^{(c)}. \quad (2)$$

где: $\Delta Z_{nv}^{(c)}$ – приращение исходных функций, n – номер шага, v – номер функции (координаты, смещение опор, продольная сила)

$\sum_{\mu=1}^{\mu=\mu} \Delta x_{n\mu}$ – сумма приращения шага, μ -номер параметра, который получает приращение от

1 параметра до нескольких

$\Delta x_{n\mu}$ – приращение шага на оси x (абсцисс)

$A'_{v\mu}\left(x_{n-1,\mu} + \frac{\Delta x_{n\mu}}{2}, y_{n-1} + \frac{\Delta y_n^{(c-1)}}{2}\right)$ – производная Фреше, v – номер функции, μ – номер параметра

x_{n-1} – предыдущий шаг, по какому-либо параметру X

X – прогиб, температура, осадка и т.д.

y_{n-1} – искомая функция на предыдущем шаге, на настоящем шаге.

Здесь C_k – конечная итерация, на которой процесс сходимости решения по достижении заданной точности завершается.

Поясним разрабатываемый алгоритм, рассматривая этот процесс как многовекторный. Совокупность векторов: $Y(N_s, x_a, y_a, z_a, E_s, F_a, I_a$ и т.д.) – жесткостные функции накоплений; $Z(N_s, u_a, v_a, w_a, dP, \sigma_{ab}$ и т.д.) – искомые функции; $Q(P, T, C, u_a, v_a, w_a, q$ и т.д.) – нагрузочные факторы, определяют процесс нагружения нелинейной системы, описываемой функционалом, в который входят параметры, в том числе нагрузочные факторы, и различные функции, зависящие от параметров.

Проиллюстрируем процесс нагружения системы, когда вся нагрузка прикладывается на одном шаге, а итерационный процесс представляет собой совокупность множества последовательных итераций, позволяющих получить точный результат.

В начальной точке (то есть на конечной стадии монтажа) система характеризуется начальным избыточным давлением воздуха и остальными жесткостными функциями накоплений.

На второй итерации, снова в ее начальной точке, которую мы получаем переносом начала координат ХОР по оси нагрузки P или по условной кривой истинного решения задачи, система получит приращение нагрузки (другие жесткостные функции накоплений в осредненном виде, согласно формуле Эйлера-Коши, корректируются по формулам численной процедуры).

Поскольку в конце s -той итерации в процессе последствия нагрузка P меняется на величину $PC(SL\%) = -DP^{(c)}$, то, чтобы в начале итерации $s+1$ избыточное давление в линзе, от которой зависит фактическая пневматическая нагрузка на пояса, была равна заданной постоянной величине P , она должна стать вследствие корректировки равной $P^{(c+1)} = P^{(c)} - DP^{(c)}$. В частном случае $P^{(c)} = P$, если $P = \text{const}$ и по замыслу расчетчика не меняется в процессе нагружения системы.

Третья итерация – это снова новый этап, то есть новая итерация с теми же свойствами, что и вторая итерация. Этот итерационный процесс продолжается до достижения заранее заданного избыточного давления воздуха в линзе в конце процесса нагружения. Сходимость итераций численной процедуры Эйлера-Коши доказана профессором Коши. При этом хорда, отражающая собой процесс нагружения системы, при увеличении числа итераций постепенно наклоняется к истинной кривой решения задачи, и при достижении заданной точности на последней итерации расчет завершается.

Обсуждение результатов. Рассмотрим процесс сходимости параметров при решении задачи итерационным методом Эйлера-Коши, при достаточно большом начальном избыточном давлении воздуха в линзе большого пролета, довольно быстро сходится, что можно видеть по результатам, выведенным на печать в конце каждой итерации (полная распечатка результатов решения задачи 1). Для наглядности и удобства чтения материала сделаем выписку из распечатки результатов расчета указанной задачи.

Задача 1. Статический расчет на ЭВМ нелинейной линзообразной мембранно-пневматической системы покрытия пролетом 150 м на действие снеговой нагрузки, равномерно распределенной по всему пролету с учетом последствия давления воздуха.

Избыточное давление в линзе 5000 Па

Исходные данные:

Число шагов $NK=1$

Число итераций на шаге $CK=25$

Признак наличия подкачки-утечки воздуха $P=0$

Признак силового воздействия $Q=1$

Признак температурного воздействия $T=0$

Признак кинематического воздействия $C = 0$

ЕІ% - признак наличия изгибного элемента, 1-есть, 0-нет, $EI = 0$

Длина пролета системы $L = 150$

Число узлов системы $K = 24$

Избыточное давление в линзе на монтаже $DP1(SL) = 5000$

Приращение давления воздуха подкачкой $DP(SL) = 0$

Температура поясов линз на стадии монтажа $TH1(SL), TH2(SL) = 273, 273$

Приращения температур поясов линз на стадии эксплуатации

$DTH1(SL), DTH2(SL) = 0, 0$

Сосредоточенные силы $Q(I)$, действующие на систему

$Q(2) = 17162.5 (H)$

$Q(4) = 17162.5 (H)$

$Q(6) = 17162.5 (H)$

$Q(8) = 17162.5 (H)$

$Q(10) = 17162.5 (H)$

$Q(12) = 17162.5 (H)$

$Q(14) = 17162.5 (H)$

$Q(16) = 17162.5 (H)$

$Q(18) = 17162.5 (H)$

$Q(20) = 17162.5 (H)$

$Q(22) = 17162.5 (H)$

Погонная нагрузка на пояса от собственного веса $Q1, Q2 = 800, 640 (H)$

Число узлов, имеющих искомое перемещение, $KH = 22$

Число панелей системы $NP = 12$ Длина панели системы $LP = 12.5 (m)$

Массив площадей поперечных сечений элементов системы

$FS(1) = .01 (m^2)$ $FS(2) = .008 (m^2)$

Массив модулей упругости $ES(1) = 2.06E+11$ $ES(2) = 2.06E+11$

Массив удельных весов материала элементов системы

$MS(1) = 78000$ $MS(2) = 78000$

Массив температурных коэффициентов материалов

$ALT(1) = .000011$ $ALT(2) = .000011$

Вычисляемые данные:

$T1(SL) = 273$ $TN(SL) = 0$ $P1(SL) = 106937$ $DPN(SL) = 0$

Результаты счета

Счет на шаге $N=1$ $CI = 1$

Объем полости линзы на стадии эксплуатации $V2 = 1310.888632296489$

Приращение объема полости линзы $DV = -6.380195828511432$

Давление в линзе $P(SL\%) = 107456.2$

Приращение давления в деформированной линзе $PC(SL\%) = 519.2071$

Счет на шаге $N=1$ $CI = 2$

Объем полости линзы на стадии эксплуатации $V2 = 1314.110789233215$

Приращение объема полости линзы $DV = -3.158038891785282$

Давление в линзе $P(SL\%) = 107193.7$

Приращение давления в деформированной линзе $PC(SL\%) = 256.68$

Счет на шаге $N=1$ $CI = 3$

Объем полости линзы на стадии эксплуатации $V2 = 1312.443469959448$

Приращение объема полости линзы $DV = -4.825358165551961$

Давление в линзе $P(SL\%) = 107329.4$

Приращение давления в деформированной линзе $PC(SL\%) = 392.4455$

Счет на шаге $N=1$ $CI = 25$

Результаты в конце шага N

$V2A = -647.7321804031104\#$ $V2B = 661.0205411217902\#$

Объем полости линзы на стадии эксплуатации $V2 = 1308.752721524901$

Приращение объема полости линзы $DV = -4.258256100902827$

Приращение температуры в линзе $TN(SL\%) = 0$

Температура в линзе по Кельвину 273

Избыточное давление в линзе $PL(SL\%) = 5346.2485$

Приращение давления в линзе $PN(SL\%) = 346.2485$

Горизонтальные перемещения

U(1) = 2.908222306885992D-03
U(2) = 4.449128301799895D-03
U(3) = 4.675457801298119D-03
U(4) = 3.790125136516989D-03
U(5) = 2.103857555211089D-03
U(6) = 3.9932433889585D-17
U(7) = -2.103857555211007D-03
U(8) = -3.790125136516898D-03
U(9) = -4.675457801298013D-03
U(10) = -4.449128301799762D-03
U(11) = -.0029082223068858
U(12) = -7.329332054389728D-04
U(13) = -1.069566267247685D-03
U(14) = -1.085604377155209D-03
U(15) = -8.592729944372439D-04
U(16) = -4.703824476720486D-04
U(17) = -1.699991683181457D-18
U(18) = 4.703824476720445D-04
U(19) = 8.592729944372382D-04
U(20) = 1.085604377155208D-03
U(21) = 1.06956626724768D-03
U(22) = 7.329332054389762D-04
U(23) = 0
U(24) = 0

Вертикальные перемещения

V(1) = 3.132235266856816D-02
V(2) = 5.939900049620024D-02
V(3) = .0827531449995057
V(4) = .1002494812256738
V(5) = .1110636643797562
V(6) = .1147270740869746
V(7) = .1110636643797561
V(8) = .1002494812256735
V(9) = 8.275314499950526D-02
V(10) = 5.939900049619951D-02
V(11) = 3.132235266856695D-02
V(12) = 7.374991604919625D-03
V(13) = 1.347822348083341D-02
V(14) = 1.826730166510306D-02
V(15) = 2.171089494874311D-02
V(16) = 2.378503595045788D-02
V(17) = .024478460423578310
V(18) = 2.378503595045782D-02
V(19) = 2.171089494874302D-02
V(20) = 1.826730166510304D-02
V(21) = 1.347822348083334D-02
V(22) = 7.374991604919647D-03
V(23) = 0
V(24) = 0

Как следует из табл. 1, геометрическая и физическая нелинейность системы составила – 49,95 %. Известная процедура Эйлера-Коши с достаточной точностью учитывает геометрическую нелинейность системы (геометрическая нелинейность в данном случае составляет не более 20 %, в данном примере учитываем пролет, нагрузку, прогибы мембран нижней и верхней).

Таблица 1. Результаты расчета системы пролетом 150 метров на распределенную нагрузку QL

№ п/п	Методика расчета Method of calculation	Приращение избыточного давления воздуха в линзе Increment of excess air pressure in the lens	Различие в приращениях избыточного давления воздуха, выраженное в процентах Difference in excess air pressure increments, expressed as a percentage
1	Расчет 1 порядка точности при $S_k = 1$	$PC(SL\%) = 519,2071$ Па	49,95%
2	Расчет 3 порядка точности при $S_k = 3$	$PC(SL\%) = 392,4455$ Па	13,34%
3	Расчет 3 порядка точности при $S_k = 25$	$PC(SL\%) = 346.2485$ Па	-

Усовершенствованная численная процедура Эйлера-Коши третьего порядка точности позволила учесть 49,95% физической и геометрической нелинейности пневматической системы. Далее высчитываем физическую нелинейность работы воздуха и гибких мембран, между которыми он закачан.

Получается $49,95 - 20 = 29.95$ % составляет физическая нелинейность работы воздуха. Так как в предыдущих исследованиях нами было установлено, что геометрическая нелинейность в таких системах может достигать значений 20%, то данное значение берем для расчета. Как получена цифра 49,95 %. Для этого берем из счета на 1, 3 и 25 итерациях значения приращения давления. Так как мы заканчиваем счет, когда в результатах совпали шесть цифр после запятой

это произошло на 25ой итерации данные совпали с данными 24ой итерации. Поэтому данные с 25 итерации берем за 100 %

Получается пропорция 346, 25 -100%
519,2071 –x%

Отсюда получаем $x = 49,95\%$, аналогично получаем значение и $13,34\%$

Если мы вычтем из величины $49,95 - 13,34 = 36,61\%$ т.е. столько было учтено геометрической и физической нелинейности работы воздуха и мембран системы обычной процедурой Эйлера –Коши с тремя итерациями. Это очень хороший результат, показывающий эффективность данной итерационной процедуры при расчете нелинейных пневмосистем. Что такое последствие в системе, в специальной литературе дается такое определение «это изменение состояния системы после окончания действия нагрузки на нее, за счет того что приложенная к системе нагрузка вызывает перемещение верхнего пояса, при перемещении пояса уменьшается объем

воздуха в пневмолинзе по формуле $\frac{P_0 V_0}{T_0} = \frac{PV}{T}$ уравнения универсального состояния газа вид-

но, что с уменьшением объема увеличивается давление внутри пневмополости, при увеличении давления уменьшаются прогибы системы, пояса идут вверх и вниз, что вызывает увеличение объема воздуха.

Соответственно, некоторое время нужно после приложения нагрузки, чтобы система пришла в равновесие, это состояние системы до того как она придет в равновесие и называют последствием.

При использовании стандартной численной процедуры Эйлера-Коши третьего порядка точности с числом итераций $C_k = 3$ учитывается только часть геометрической и физической нелинейности, которая возникает в процессе действия приложенных традиционных нагрузок. Но расчет при $C_k = 3$ не учитывает ту геометрическую и физическую нелинейность, которая наблюдается при последствии в процессе дальнейшего перераспределения пневматических нагрузок, усилий и перемещений системы, и которая названа нами «последствием». Система без учета последствия еще не находится в равновесном состоянии (хотя система уравнений метода перемещений МКЭ удовлетворена), так как остались не учтенными те приложенные к системе пневматические силы, действия которых не были учтены стандартной процедурой Эйлера-Коши. [18- 20].

Вывод. Расчет пневматической системы с учетом последствия может быть произведен тем же итерационным методом приращений параметров с применением численной процедуры Эйлера-Коши третьего или более высокого порядка точности. Это возможно благодаря тому, что численная процедура Эйлера-Коши является универсальным итерационным процессом. Последствие - это учет физической нелинейности упругих свойств воздуха, закаченного в герметичную пневмолинзу покрытия сооружения, которую не удалось учесть на трех стандартных итерациях метода Эйлера –Коши. Чтобы рассчитать процесс последствия нужно на том же шаге нагружения увеличить число итераций до той величины, которую легко определить, произведя полный расчет на ЭВМ в данном исследовании удалось рассчитать эту часть физической нелинейности с помощью 25 итераций. Совпадение величины избыточного давления на двух соседних итерациях свидетельствует о том, что процесс расчета последствия завершен. В этом случае накопленное избыточное давление воздуха в линзе будет полностью израсходовано на перемещения поясов линзы, и процесс дальнейшего движения системы остановится.

Как нами было установлено, что геометрическая нелинейность может быть от 5 до 10%, если в сооружении маленький или средний пролет, и нагрузка на сооружение не очень большая, особенно если речь об участковой нагрузке. Если же пролет сооружения составляет 120-150 метров, а нагрузка и прогибы достаточно большие, то геометрическая нелинейность может составлять 20% и более процентов. Также по итогам исследования выявлена, что физическая нелинейность, которая нами учтена стандартной процедурой Эйлера-Коши третьего порядка точности, при большом пролете сооружения и большой величины нагрузки составляет примерно

13-21%, а ту часть физической нелинейности воздуха, закаченного между герметичных мембран сооружения, которую нам удалось посчитать с помощью усовершенствованной формулы Эйлера-Коши, при числе итераций 20-25, и которую мы назвали «последствие» по результатам нашего исследования составляет от 2-7%.

Данное сооружение состоящее из легких металлических конструкций, можно возвести в течение нескольких месяцев на готовый свайный или ленточный фундамент. Такие сооружения легко выдерживают многие виды динамической нагрузки, а именно ветровую, сейсмическую, вибрационную и на треть дешевле, чем здания из традиционных материалов. [1, 5, 14, 15, 17]. Авторы статьи надеются, что данное исследование поможет создать уточненный метод расчета таких сооружений, и снизить стоимость данных объектов, что в условиях санкций и мирового кризиса очень важно.

Библиографический список:

1. Брудка Ян, Лубински Мечислав. Легкие стальные конструкции (перевод с польского). – Москва, Стройиздат, 1974.
2. Городецкий, А.С. Метод конечных элементов в проектировании транспортных сооружений. / А.С. Городецкий и др. – М.: Транспорт, 1981.– 143 с.
3. Давиденко Д. Ф. О приложении метода вариации параметра к теории нелинейных функциональных уравнений. / Д.Ф. Давиденко // Укр. матем. журнал, 1955. т. 7. – Киев., с. 56–64.
4. Давиденко Д.Ф. О применении метода вариации параметра к построению итерационных формул повышенной точности для определения численных решений нелинейных интегральных уравнений. Докл. АН СССР, т. 162.– М., 1965, с. 78–85.
5. Иванова Т.В., Альберт И.У., Кауфман Б.Д., Шульман С.Г. Несущая способность висячих свай по критерию прочности материала сваи или грунта // Инженерно-строительный журнал, 2016 – №7 (67). – С. 3-12.
6. Игнатьев А.В. Основные формулировки метода конечных элементов в задачах строительной механики. Часть 3 // Вестник МГСУ 2015. № 1. С. 16—26.
7. Ким А.Ю. Итерационный метод приращений параметров для расчёта нелинейных мембранно-пневматических систем с учётом упругой работы воздуха / А.Ю. Ким // Вестник СГАУ. - 2005.- № 1. - С. 39-42.
8. Ким А.Ю. Расчет мембранно-пневматических систем с учетом нелинейных факторов. Монография. Континуальные расчетные схемы / А.Ю.Ким. Саратов. гос. аграр. ун-т.- Саратов, 2000. - 198 с.- Деп. в ВИНТИ 24.04.00. - № 1148 - В2000.
9. Ким А.Ю. Многопролетные мембранно-стержневые покрытия сооружений/ А.Ю. Ким // Вестник СГАУ. - 2003.- № 2. - С. 72-74.
10. Металлические конструкции, под ред. Ю.И. Кудишина, Москва, Академия, 2008 г.-688 с.
11. Петров, В.В. Метод последовательных нагружений в нелинейной теории пластинок и оболочек. / В.В. Петров – Саратов: Изд-во СГУ, 1975.– 118 с.
12. Петров В.В. Нелинейная инкрементальная строительная механика – М.: Инфра-Инженерия, 2014. – С. 480.
13. Полников, С.В. Расчет нелинейных линзообразных мембранно-пневматических покрытий сооружений больших пролетов итерационным методом приращений параметров с усовершенствованной численной процедурой / С.В. Полников, С.П. Харитонов // Научное обозрение. - 2017. - № 19. - С. 35-41 12.
14. Симиу Э., Сканлан Р. Воздействие ветра на здания и сооружения. М.: Стройиздат, 1984. 360 с.
15. СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия»
16. Стренг Г., Фикс Д. Теория метода конечных элементов. / Г. Стренг, Д.М. Фикс: Мир, 1977. – 349 с.
17. Трофимов В.И., Еремеев П.Г. «Мембранные конструкции зданий и сооружений» – Москва, Стройиздат, 1990.-447 с.
18. Belostosky, A.M. Adaptive Finite Element Models Coupled with Structural Health Monitoring Systems for Unique Buildings /A.M. Belostosky, P.A. Akimov // Procedia Engineering. – 2016. – Vol. 153. – P. 83–88.
19. Travush V.I. Contemporary Digital Technologies in Construction Part 1: About Mathematical (Numerical) Modelling / V.I. Travush, A.M. Belostosky, P.A. Akimov. – DOI 10.1088/1757-899X/456/1/012029 // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – T 456.
20. Schulz M., Pellegrino S. Equilibrium paths of mechanical systems with unilateral constraints. Part I. Theory // Pro-ceeding of the Royal Society. Ser. A. 2000. Vol. 456. No 8. Pp. 2223–2242.

References:

1. Brudka Jan, Lubinski Mechislav. Light steel structures (translated from Polish). Moscow, *Stroyizdat*, 1974. (In Russ)
2. Gorodetskiy A.S. Finite element method in the design of transport facilities.M.: *Transport*. 1981:143. (In Russ)
3. D. F. Davidenko, On the application of the parameter variation method to the theory of nonlinear functional equations.. *Ukr. math. magazine*, Kyiv.1955; 7: 56–64.
4. Davidenko D.F. On the application of the parameter variation method to the construction of iterative formulas of increased accuracy for determining the numerical solutions of nonlinear integral equations. Dokl. AN SSSR, M., 1965; 162: 78–85. (In Russ)
5. Ivanova T.V., Al'bert I.U., Kaufman B.D., Shul'man S.G. Bearing capacity of hanging piles according to the criterion of the strength of the pile material or soil. *Civil Engineering Journal* 2016; 7 (67): 3-12. (In Russ)
6. Ignatiev A.V. Basic formulations of the finite element method in problems of structural mechanics. *Vestnik MGSU*. 2015;3(1):16-26. (In Russ)

7. Kim A.Yu. Iterative method of parameter increments for calculation of nonlinear membrane-pneumatic systems taking into account the elastic work of air.. *Vestnik SGAU*. 2005; 1: 39-42. (In Russ)
8. Kim A.Yu. Calculation of membrane-pneumatic systems taking into account non-linear factors. Monograph. Continuum calculation schemes. *Sarat. state agrarian un-t*. Saratov 2000; (1148):198 Dep. v VINITI 24.04.00. (In Russ)
9. Kim A.Yu. Multi-span membrane-rod coatings of structures. *Vestnik SGAU* 2003; 2: 72-74. (In Russ)
10. Metal structures, ed. Yu.I. Kudishina, Moscow, *Academy*, 2008: 688. (In Russ)
11. Petrov V.V. Method of successive loadings in the nonlinear theory of plates and shells. Saratov: Izd-vo SGU, 1975: 118. (In Russ)
12. Petrov V.V. Nonlinear incremental structural mechanics. M. : *Infra-Engineering*. 2014: 480. (In Russ)
13. S.V. Polnikov, S.P. Kharitonov. Calculation of non-linear lenticular membrane-pneumatic coatings for large-span structures using the iterative method of parameter increments with an improved numerical procedure. *Scientific Review*. 2017; 19: 35-41 12. (In Russ)
14. Simiu E., Scanlan R. Influence of wind on buildings and structures. Moscow: *Stroyizdat*, 1984:360. (In Russ)
15. SP 20.13330.2016 "Loads and impacts"
16. Streng G., Fix D. Theory of finite element method. Mir, 1977: 349. (In Russ)
17. Trofimov V.I., Eremeev P.G. "Membrane structures of buildings and structures" Moscow, *Stroyizdat*, 1990:447. (In Russ)
18. Belostosky, A.M. Adaptive Finite Element Models Coupled with Structural Health Monitoring Systems for Unique Buildings /A.M. Belostosky, P.A. Akimov. *Procedia Engineering*. 2016; 153: 83–88.
19. V.I. Travush, A.M. Belostosky, P.A. Akimov. Contemporary Digital Technologies in Construction Part 1: About Mathematical (Numerical) Modelling. DOI 10.1088/1757-899X/456/1/012029 . *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018; 456.
20. Schulz M., Pellegrino S. Equilibrium paths of mechanical systems with unilateral constraints. Part I. Theory. *Pro-ceeding of the Royal Society. Ser. A*. 2000; 456(8): 2223–2242.

Сведения об авторах:

Ким Алексей Юрьевич, доктор технических наук, профессор, кафедра строительных материалов, конструкций и технологий; sberbanksp@yandex.ru

Полников Сергей Валерьевич, аспирант, кафедра строительных материалов, конструкций и технологий; Werad91@mail.ru orcid: 0000-0002-4670-309X

Миша Фрикович Амоян, аспирант, кафедра строительных материалов, конструкций и технологий; ezid-007@ya.ru

Information about authors:

Aleksey Yu.Kim, Dr.Sci. (Eng), Prof., Department of Building Materials, Structures and Technologies; sberbanksp@yandex.ru

Sergey V. Polnikov, Postgraduate Student, Department of Building Materials, Structures and Technologies; Werad91@mail.ru orcid: 0000-0002-4670-309X

Misha F. Amoyan, Postgraduate Student, Department of Building Materials, Structures and Technologies; ezid-007@ya.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/ Received 11.10.2022.

Одобрена после рецензирования / Reviced 30.10.2022.

Принята в печать/ Accepted for publication 30.10.2022.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 624.016.5

DOI: 10.21822/2073-6185-2022-49-4-162-168

Оригинальная статья /Original Paper

Исследование зависимости максимальных нормальных напряжений в сечениях тонкостенных стержней от кривизны изогнутой оси при продольном изгибе

А.С. Личковаха¹, Б.А. Шемшура¹, С.А. Кузнецов²

¹Ростовский государственный университет путей сообщения,

¹344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского стрелкового полка народного ополчения, 2, Россия,

²Южно-Российский государственный политехнический университет имени М.И. Платова,

²346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является определение зависимости нормального напряжения от радиуса кривизны гибкого стержня при различной толщине. **Метод.** Применен метод определения максимальных напряжений в продольно сжатом стержне большой гибкости с помощью эллиптических интегралов **Результат.** Выполнено моделирование тонкостенного продольно сжатого стержня в расчётном комплексе ANSYS. **Вывод.** Точная теория расчета гибких стержней позволяет определить значение осевой силы при продольном сжатии, при которой концы стержня сомкнутся. При решении задач практического использования такого типа стержней интерес представляет определение максимальных напряжений, причем в любой стадии деформации, что позволяет с большей точностью выбрать размерные параметры упругого элемента и его материал.

Ключевые слова: стержень большой гибкости, кривизна упругой линии, продольный изгиб, метод эллиптических параметров

Для цитирования: А.С. Личковаха, Б.А. Шемшура, С.А. Кузнецов. Исследование зависимости максимальных нормальных напряжений в сечениях тонкостенных стержней от кривизны изогнутой оси при продольном изгибе. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022; 49(4):162-168. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-4-162-168.

Study of the dependence of the maximum normal stresses in the sections of thin-walled rods on the curvature of the bent axis in the longitudinal bending

A.S. Lichkovakha¹, B.A. Shemshura¹, S.A. Kuznetsov²

¹Rostov State Transport University,

¹2 Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya Square, Rostov-on-Don 344038, Russia,

²M.I. Platova South Russian State Polytechnic University,

²132 Prosveshcheniya Str., Novocherkassk 346428, Russia

Abstract. Objective. The aim of the study is to determine the dependence of the normal stress on the radius of curvature of a flexible rod at different thicknesses. **Method.** A method was applied to determine the maximum stresses in a longitudinally compressed rod of high flexibility using elliptic integrals. **Result.** Modeling of a thin-walled longitudinally compressed rod was performed in the ANSYS calculation complex. **Conclusion.** The exact theory for calculating flexible rods allows you to determine the value of the axial force during longitudinal compression, at which the ends of the rod will close. When solving the problems of practical use of this type of rods, it is of interest to determine the maximum stresses, and at any stage of deformation, which makes it possible to choose the dimensional parameters of the elastic element and its material with greater accuracy.

Keywords: highly flexible rod, curvature of an elastic line, buckling, elliptical parameters method

For citation: A.S. Lichkovakha, B.A. Shemshura, S.A. Kuznetsov. Study of the dependence of the maximum normal stresses in the sections of thin-walled rods on the curvature of the bent axis in

the longitudinal bending. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2022; 49(4): 162-168. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-4-162-168.

Введение. Определение величины максимальных напряжений является одной из основных задач в области проектирования и эксплуатации механизмов и конструкций [1]. Численной характеристикой степени влияния внешних сил на деформируемый элемент большой гибкости в теории расчета, предложенной Е.П. Поповым [2] является величина изгибающего момента, которая и определяет значение напряжений в тонкостенных стержнях, при этом кривизна стержня, точнее, радиус его кривизны, входит в формулу определения момента:

$$M = \frac{EJ}{\rho} \quad (1)$$

Здесь E – модуль упругости материала, J – осевой момент инерции сечения, $H = EJ$ – изгибная жёсткость стержня, ρ – радиус кривизны изогнутой оси стержня – (величина, обратная кривизне $\chi = \frac{1}{\rho}$)

Постановка задачи. С целью установления влияния минимальной кривизны стержня на значение максимальных напряжений соответствующая зависимость может быть формализована с учетом геометрического представления эллиптических интегралов Лежандра, выполненного учеными Томского политехнического университета [3].

При исследовании на прочность стержней малой гибкости опорные реакции и внутренние силовые факторы определяются из условия, что первоначально стержни являются абсолютно твёрдыми, поэтому изгибающие моменты и нормальные напряжения, равные отношению максимального изгибающего момента к осевому моменту сопротивления не будут зависеть от изменения кривизны стержня. При определении изгибающих моментов в стержнях большой гибкости (тонкостенные стержни) кривизна упругой линии изменяется существенно. Теоретически точное значение кривизны определяется по формуле

$$\chi = \frac{\frac{d^2 y}{dx^2}}{\sqrt{[1 + (\frac{dy}{dx})^2]^3}}, \quad (2)$$

но необходимо установить координаты точки с максимальной кривизной.

С другой стороны, точное значение кривизны упругой линии можно вычислить из равенства (1), если известны величина изгибающего момента, соответствующая радиусу кривизны и изгибная жёсткость стержня. Зависимость изгибающего момента от геометрических параметров гибкого стержня и осевой силы установлена Е.П. Поповым [2] и имеет вид

$$M = \frac{2k \cos \psi Fl}{\beta} - H \chi_0 \quad (3)$$

Здесь k – эллиптический модуль, ψ – эллиптическая амплитуда в рассматриваемом сечении, F – сила, сжимающая стержень, H – изгибная жёсткость стержня, l – длина гибкого стержня, β – силовой коэффициент, χ_0 – начальная кривизна стержня.

Методы исследования. В качестве примера определим максимальные нормальные напряжения в тонкостенном стержне, продольно сжатого силой F (рис.1), когда начальная кривизна равна нулю. В точке сжатия (точка С рис.1 б) изгибающий момент будет максимальным, где эллиптическая амплитуда $\psi = \pi$.

На основе метода эллиптических интегралов [2] и их геометрического представления [3] определим зависимости параметров изогнутого стержня и силовых факторов, зависящих от конфигурации изогнутого стержня.

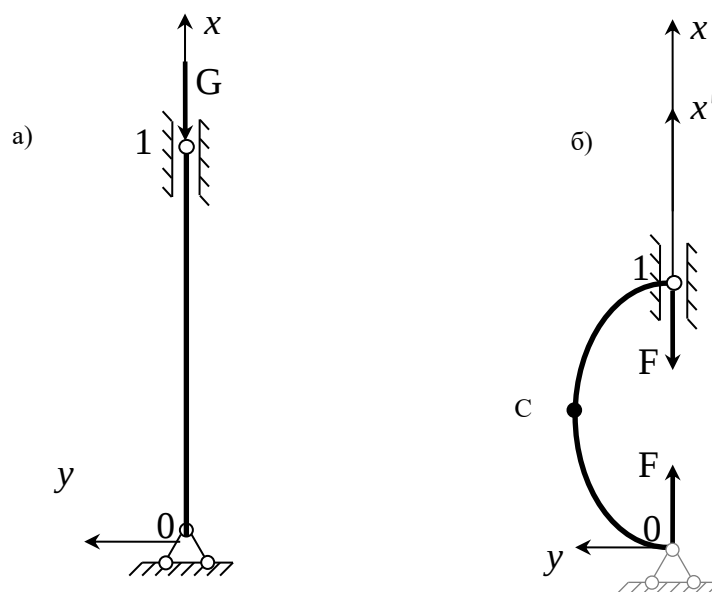


Рис. 1. Расчетная схема гибкого стержня с шарнирами на концах:
 а – исходный вид; б – деформированный осевой силой

Fig. 1. Calculation scheme of a flexible rod with hinges at the ends:
 a – original view; b - deformed by axial force

Модулярный угол α

$$\cos \alpha = 0,5\left(\frac{b}{l} + 1\right). \quad (4)$$

Эллиптический модуль k

$$k = \sqrt{1 - \left(\frac{b+l}{2l}\right)^2}. \quad (5)$$

Силовой коэффициент β

$$\beta = \frac{\pi}{2} \left[\frac{1 + 0,5\left(\frac{b}{l} + 1\right)}{0,5\left(\frac{b}{l} + 1\right)} \right]. \quad (6)$$

Сила, сжимающая стержень

$$F = \frac{\pi^2 H [1 + 0,5\left(\frac{b}{l} + 1\right)]^2}{l^2 \left(\frac{b}{l} + 1\right)^2}. \quad (7)$$

Максимальный прогиб

$$f_{\max} = \frac{2 \cdot l \sqrt{1 - \left(\frac{b+l}{2l}\right)^2} \cdot \left(\frac{b}{l} + 1\right)}{\pi [1 + 0,5\left(\frac{b}{l} + 1\right)]}. \quad (8)$$

Отличительной особенностью представленных зависимостей (4–8) является то, что все параметры уравнений, зависящие от конфигурации стержня, выражены через длину стержня l и хорду b , соединяющую концы стержня. Используя эти выражения, получим формулу для вычисления максимальных изгибающих моментов в сечениях тонкостенных стержней

$$M_{\max} = \frac{2\pi H [1 + 0,5\left(\frac{b}{l} + 1\right)]^2}{l \left(\frac{b}{l} + 1\right)^2} \cdot \frac{\sqrt{1 - \left(\frac{b+l}{2l}\right)^2}}{[1 + 0,5\left(\frac{b}{l} + 1\right)]} \quad (9)$$

Минимальный радиус кривизны

$$\rho_{\min} = \frac{EJ}{M_{\max}} \quad (10)$$

$$\text{Максимальные нормальные напряжения } \sigma_{\max} = \frac{Et}{2\rho} \quad (11)$$

Кроме того, полученные данные могут быть использованы для проверочного расчета по формуле (2), так как абсцисса искомой точки равна собственно максимальному прогибу, а ордината равна половине хорды. Рассмотрим варианты определения радиуса кривизны и напряжения в гибких стержнях: в первом случае, если известна конфигурация изогнутой оси стержня (для схемы представленной на рис.1 задаётся длина хорды b); во втором случае, когда заданы силовые факторы (для схемы представленной на рис.1 задана сжимающая сила F).

Первый вариант. Определить максимальное нормальное напряжение и минимальный радиус кривизны упругой линии стержня, а также вычислить значение силы, которую следует приложить к прямолинейному тонкостенному стержню рис.1, чтобы концы его соприкоснулись ($b = 0$). Исходные данные задачи: длина стержня $l = 0,4 \text{ м}$, ширина $5,15 \text{ мм}$ и толщина $0,5 \text{ мм}$ прямоугольного сечения ($5,15 \times 0,5 \text{ мм}$), момент сопротивления $W = 0,215 \text{ мм}^3$, осевой момент инерции $J_{\min} = 0,053 \text{ мм}^4$, изгибная жёсткость стержня $H = 0,01073 \text{ Нм}^2$.

Так как при соприкосновении концов стержня длина хорды $b = 0$, то из формулы (7) сжимающая сила равна

$$F = \frac{3,14^2 \cdot 0,0107 \cdot 1,5^2}{0,4^2} = 1,484 \text{ Н}.$$

Максимальный изгибающий момент по формуле (9)

$$M_{\max} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 0,0107 \cdot 1,5^2}{0,4[1 + 0,5]} \cdot \frac{\sqrt{1 - \left(\frac{l}{2l}\right)^2}}{0,4[1 + 0,5]} = 0,218 \text{ Нм}.$$

Минимальный радиус кривизны по формуле (10)

$$\rho_{\min} = \frac{H}{M} = 0,049 \text{ м}.$$

Максимальное напряжение по формуле (11)

$$\sigma_{\max} = \frac{Et}{2\rho} = \frac{2 \cdot 10^{11} \cdot 0,5 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 0,049 \cdot 10^6} = 1020 \text{ МПа}$$

Для схемы на рис. 1 определены графические зависимости максимальных нормальных напряжений от радиуса кривизны гибких стержней, когда их концы соединены рис.2 (кривая 1 – $t = 0,5 \text{ мм}$, кривая 2 – $t = 2 \text{ мм}$, кривая 3 – $t = 4 \text{ мм}$).

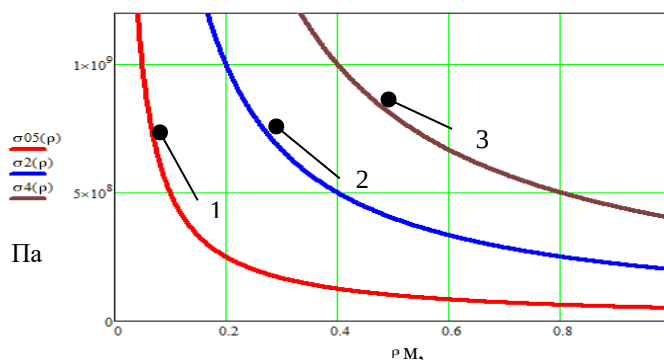


Рис. 2. Зависимости изменения нормального напряжения от радиуса кривизны гибкого стержня при различной толщине

Fig. 2. Dependences of the change in normal stress on the radius of curvature of a flexible rod at different thicknesses

Из рис. 2 видно, что при увеличении толщины стержня напряжения при одинаковых радиусах кривизны значительно увеличиваются. Эти результаты имеют значение при проектировании упругих элементов с нелинейной (регрессивно-прогрессивной) характеристикой [4-6], и их исследовании [7-9], причем при задании входных параметров практически удобно задавать именно размер хорды, соответствующий максимальной деформации гибкого стержня.

Второй вариант (в данном случае является проверочным). Для стержня на рис.1 с исходными данными предыдущей задачи вычислить длину хорды сжатого стержня под действием силы $F=1,484 \text{ Н}$ и определить максимальный изгибающий момент.

Силовой коэффициент подобия согласно [2] $\beta = l \sqrt{\frac{F}{H}} = 0,4 \sqrt{\frac{1,484}{0,0107}} = 4,71$

Для схемы на рис.1 эллиптические амплитуды в характерных точках равны $\psi_0 = \frac{\pi}{2}$, $\psi_{т.с.} = \pi$, $\psi_1 = \frac{3\pi}{2}$.

Силовой коэффициент подобия β также связан с эллиптическими параметрами зависимостью

$$\beta = F(\psi_1) - F(\psi_0). \quad (12)$$

Для заданной расчетной схемы (рис.1) $\beta = F(\frac{3\pi}{2}) - F(\frac{\pi}{2}) = 2F(k)$

Тогда полный интеграл первого рода $F(k) = \frac{\beta}{2} = \frac{4,71}{2} = 2,355$

Аналитическое значение полного эллиптического интеграла первого рода согласно исследованиям [3] определяется по формуле

$$F(k) = \frac{0,5\pi}{1 - \tan^2 \frac{\alpha}{2}} \quad (13)$$

Из уравнения (13) определяется модулярный угол α

$$\frac{\alpha}{2} = \arctg \sqrt{1 - \frac{0,5\pi}{F(k)}} = 30^\circ \rightarrow \alpha = 60^\circ$$

Модуль эллиптического интеграла $k = \sin \alpha = \sin 60 = 0,866$

С учетом исследований [2,3] эллиптический интеграл второго рода определим по формуле $E(k) = F(k) \cdot \cos \alpha = 2,355 \cdot \cos 60^\circ = 1,178$

Координату концевой точки стержня, равную длине хорды стержня b определим из равенства

$$\frac{x_1}{l} = \frac{2}{\beta} [E(\psi_1) - E(\psi_0)] - 1 = \frac{2}{\beta} [E(\frac{3\pi}{2}) - E(\frac{\pi}{2})] - 1 = \frac{4}{\beta} E(k) - 1 \quad (14)$$

Тогда, длина хорды $\frac{x_1}{l} = \frac{b}{l} = \frac{4}{4,71} \cdot 1,178 - 1 = 0$.

Максимальный изгибающий момент по формуле (3) равен

$$M = \frac{2 \cdot 0,866 \cdot 1,484 \cdot 0,4}{4,71} = 0,218 \text{ Нм}$$

Полученные результаты свидетельствуют о высокой точности расчетных формул. Применяя формулы (10) и (11), можно получить такое же значение радиуса кривизны и максимального нормального напряжения, как и при неизвестной силе F в первой задаче. Если, к примеру, задано значение допускаемого напряжения $[\sigma] = 300 \text{ МПа}$, то по представленным зависимостям возможно определить допускаемые значения для:

- радиуса кривизны из условия прочности согласно (10) $\frac{Et}{2\rho} \leq [\sigma]$

$$\rho = \frac{Et}{2[\sigma]} = \frac{2 \cdot 10^{11} \cdot 0,5 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 3 \cdot 10^{-8}} = 0,167 \text{ м} \quad [\rho] \geq 0,167 \text{ м}$$

- изгибающего момента из равенства (1)

$$M = \frac{H}{[\rho]} = \frac{0,01073}{0,167} = 0,0642 \text{ Нм} \quad [M] \leq 0,0642 \text{ Нм}$$

- хорды из равенства (9)

$$[M] = \frac{2 \cdot \pi \cdot H [1 + 0,5(\frac{b}{l} + 1)]^2}{l(\frac{b}{l} + 1)^2} \cdot \frac{\sqrt{1 - (\frac{b+l}{2l})^2}}{[1 + 0,5(\frac{b}{l} + 1)]}$$

$$0.0642 = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 0,01073 [1 + 0,5(\frac{b}{0,4} + 1)]^2}{0,4(\frac{b}{0,4} + 1)^2} \cdot \frac{\sqrt{1 - (\frac{b+0,4}{2 \cdot 0,4})^2}}{[1 + 0,5(\frac{b}{0,4} + 0,4)]}$$

$$[b] \geq 0,26 \text{ м}$$

- силы, сжимающей стержень из равенства (7)

$$F = \frac{\pi^2 H [1 + 0,5(\frac{[b]}{l} + 1)]^2}{l^2 (\frac{[b]}{l} + 1)^2} = \frac{3,14^2 \cdot 0,01073 [1 + 0,5(\frac{0,26}{0,4} + 1)]^2}{0,4^2 (\frac{0,26}{0,4} + 1)^2}$$

$$[F] \leq 0,81H.$$

Обсуждение результатов. С целью сопоставления результатов, полученных по предлагаемой методике, было выполнено моделирование тонкостенного продольно сжатого стержня в расчётном комплексе ANSYS [10], когда его начальная кривизна равна нулю. На рис.3 представлена расчетная модель и деформированный вид гибкого стержня (обозначена точка сжатия «С»), сжатого продольной силой.

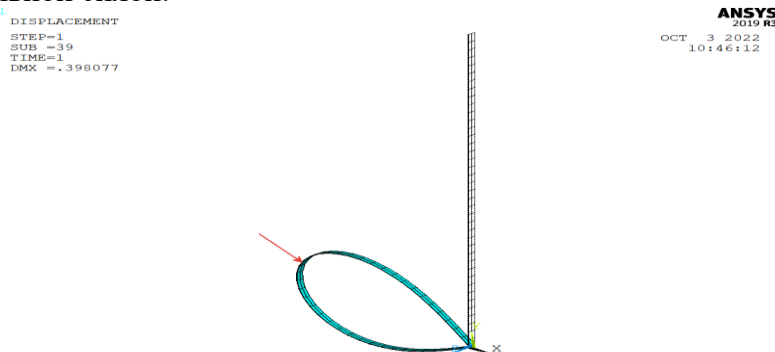


Рис.3 Расчетная модель стержня в исходном состоянии и деформированном виде

Fig.3. Calculation model of the rod in the initial state and deformed form

Результат определения максимальных нормальных напряжений представлен на рис. 4.

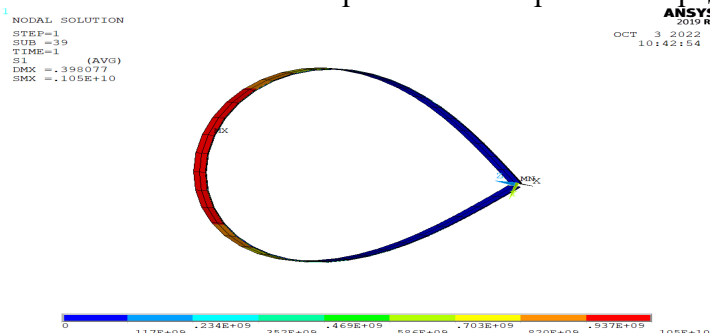


Рис.4. Распределение нормальных напряжений в гибком стержне

Fig.4. Distribution of normal stresses in a flexible rod

Полученные данные позволяют сделать вывод о достаточно высокой корреляции полученных результатов. Так, например значение максимального нормального напряжения, полученного с помощью предлагаемой методики (вариант первый, значение в МПа), имеет расхождение с программным (значение в Па) менее 3%, при этом значение силы (Н), достаточной для соприкосновения концов стержня (когда длина хорды будет равна нулю) имеет отклонение от расчетного значения также менее 3 %.

Вывод. Используемый в работе метод определения максимальных напряжений в продольно сжатом стержне большой гибкости с помощью эллиптических интегралов является перспективным при создании базы знаний для проектирования упругих элементов с нелинейной характеристикой и поиска новых технических решений; особенно удобным для практических

расчетов представляется использование в числе входных параметров величины хорды, соединяющей концы стержня.

Библиографический список:

1. Пономарёв, С.Д. Расчёты на прочность в машиностроении / С.Д. Пономарев, В.Л. Бидерман, В.И. Феодосьев. – М.: Машгиз, 1956. – Т.1. – 886с
2. Попов Е.П. Теория и расчет гибких упругих стержней. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. – 296с.
3. Анфилофьев А. В. Геометрическое представление эллиптических интегралов / А. В. Анфилофьев, В. М. Замятин // Известия Томского политехнического университета [Известия ТПУ]. 2005. Т. 308, № 5. —С. 11-14.
4. Пат. № 2706770 Российская Федерация, МПК В 60G 11/10. Упругий механизм с регрессивно-прогрессивной характеристикой. С.А. Кузнецов, А.С. Личковаха, Б.А. Шемшюра. Заявл. 09.01.2019; оп. 20.11.2019, Бюл. № 32.
5. Пат. № 2486065 Российская Федерация, МПК В 60G 11/04. Упругая подвеска с регрессивно-прогрессивной характеристикой / С.А. Кузнецов, В.Н. Семенов, Я.А. Лысенко, Ю.Ю. Олейничева. – Заявл. 15.02.2012; опубл. 27.06.2013, Бюл. № 18.
6. Пат. № 2521879 Российская Федерация, МПК В 60G 3/16. Упругая подвеска с регрессивно-прогрессивной характеристикой / В.Н. Семенов, С.А. Кузнецов, А.А. Галушкин. Заявл. 13.12.2012; оп. 10.07.2014, Бюл. № 19.
7. Личковаха, А. С. Исследование деформированного состояния и перемещений гибкого стержня с начальной кривизной / А. С. Личковаха, Б. А. Шемшюра, С. А. Кузнецов // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2020. – Т. 47. – № 1. – С. 156-164. – DOI 10.21822/2073-6185-2020-47-1-156-164.
8. Личковаха, А.С. Исследование деформации стержня большой гибкости при осевом нагружении / А.С. Личковаха, Б.А. Шемшюра, С.А. Кузнецов // Известия высших учебных заведений. Северо-кавказский регион. Технические науки. – 2016. – №3. – С. 71-76.
9. Личковаха А.С., Исследование напряжённо-деформированного состояния внецентренно сжатого стержня большой гибкости: / А.С. Кузнецов, Б.А.Шемшюра, А.С. Личковаха. Электронный научный журнал Инженерный вестник Дона №1, 2018 ivdon.ru/en/magazine/archive/n1y2018/4773-0_9p.l.
10. Басов, К. А. ANSYS для конструкторов / К. А. Басов – М. : ДМК Пресс, 2009. – 248 с.

References:

1. S.D. Ponomarev, V.L. Biderman, V.I. Feodosiev. Calculations on strength in mechanical engineering. M.: Mashgiz, 1956;1:886. [In Russ]
2. Popov, E.P. Theory and calculation of flexible elastic rods. M.: Science. Ch. Ed. fiz.-mat. lit., 1986; 296. [In Russ]
3. A.V. Anfilofiev, V.M. Zamyatin The geometric representation of elliptic integrals. News of Tomsk Polytechnic University [Izvestiya TPU]. 2005; 308:5: 11-14. [In Russ]
4. Pat. No. 2706770 Russian Federation, IPC B 60G 11/10. S. A. Kuznetsov, A. S. Lichkovakha, and B. A. Shemshura, Elastic mechanism with a regressive-progressive characteristic. Application no. 09.01.2019; published no. 20.11.2019, Byul. no. 32. [In Russ]
5. Pat. No. 2486065 Russian Federation, IPC B60G 11/04. Elastic suspension with regressive-progressive characteristic. S.A. Kuznetsov, V.N. Semenov, Ya.A. Lysenko, Yu.Yu. Oleinicheva. Application. 15.02.2012; publ. 27.06.2013, Bul. No. 18 [In Russ]
6. Pat. No. 2521879 Russian Federation, IPC B 60 G 3/16. V. N. Semenov, S. A. Kuznetsov, and A. A. Galushkin, Elastic suspension with regressive and progressive characteristics, IPC B 60G 3/16, Russian Federation. - Declared on 13.12.2012; published on 10.07.2014, Byul. no. 19. [In Russ]
7. Lichkovakha A. S., Shemshura B. A., Kuznetsov S. A. Investigation of the deformed state and displacements of a flexible rod with initial curvature. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2020;1 (47): 156-164. DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-1-156--164 [In Russ]
8. Lichkovakha A.S., Shemshura B. A., Kuznetsov S. A. Investigation of the deformation of a large flexible rod under axial loading. The North Caucasus region. Technical Sciences. 2016;3:71-76. DOI:10.17213/0321-2653-2016-191-3-71-76 [In Russ]
9. Lichkovakha, A.S., Investigation of the stress-strain state of an extra-centrally compressed rod of great flexibility / A.S. Lichkovakha, B.A. Shemshura, S.A. Kuznetsov. Engineering Bulletin of the Don, 2018; URL: ivdon.ru/en/magazine/archive/n1y2018/4773/. [In Russ]
10. Basov, K. A. ANSYS for designers. M.: DMK Press, 2009; 248. [In Russ]

Сведения об авторах:

Личковаха Андрей Сергеевич, кандидат технических наук, доцент; кафедра «Строительная механика»; lichkovaha@yandex.ru

Шемшюра Борис Андреевич, кандидат технических наук, доцент, кафедра «Строительная механика»; stroj_meh@rgups.ru

Кузнецов Сергей Анатольевич, доктор технических наук, профессор, кафедра «Общественные дисциплины»; sergey-kuznecov-57@mail.ru

Information about the authors:

Andrey S.Lichkovakha, Cand. Sci.(Eng), Assoc.Prof., Department of Building Mechanics; lichkovaha@yandex.ru

Boris A.Shemshura, Cand. Sci.(Eng), Assoc. Prof., Department of Construction Mechanics; stroj_meh@rgups.ru

Sergey A.Kuznetsov, Dr. Sci. (Eng), Prof., Department of General Engineering Disciplines; sergey-kuznecov-57@mail.ru

Конфликт интересов/ Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 29.10.2022.

Одобрена после рецензирования Revised 16.11.2022.

Принята в печать/ Accepted for publication 16.11.2022.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 624.071.22

DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-4-169-176

Оригинальная статья /Original Paper

**Применение условной оптимизации для определения допустимых нагрузок
на изгибно-жесткие нити**

Д.А. Тарасов

Пензенский государственный университет,
440026, г. Пенза, ул. Красная, 40, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является разработка методики определения допустимых нагрузок на существующие конструктивные элементы, расчетной моделью которых является изгибно-жесткая нить, исходя из требований прочности и жесткости ввиду изменившихся условий эксплуатации конструкций. **Метод.** В основу исследования положено математическое моделирование задачи условной оптимизации. В качестве целевой функции выступает полная потенциальная энергия деформации нити, обладающей некоторой изгибной жесткостью. При этом накладываются ограничения по прочности, жесткости и условию неразрывности деформаций. Используются положения теории сопротивления материалов, а также аппарата интегрального и дифференциального исчисления функций одной или нескольких переменных. **Результат.** Проведена оценка адекватности результатов, получаемых с помощью разработанной методики. Выполнен численный эксперимент по определению значения допустимой равномерно-распределенной нагрузки и соответствующему распределению напряжений и деформаций по длине нити конечной жесткости с заданными физическими и геометрическими параметрами. Установлено, что расхождения в значениях результатов, полученных с помощью предложенной технологии моделирования и коммерческой системы автоматизированного проектирования и расчета ЛИРА 10.8, реализованной на общепризнанном методе конечных элементов, составляют не более 5%. **Вывод.** Разработанная методика позволяет ставить и решать задачи по определению предельных нагрузок на изгибно-жесткие нити, исходя из допускаемых напряжений и деформаций, в отличие от существующих коммерческих систем компьютерного моделирования, решающих исключительно прямые задачи по определению напряженно-деформированного состояния различного рода конструкций. Методика может найти применение на стадии обследования большепролетных покрытий при реконструкции общественных зданий и инженерных сооружений.

Ключевые слова: условная оптимизация, допустимая нагрузка, изгибно-жесткая нить, обратная задача, геометрическая нелинейность, расчет по деформированной схеме

Для цитирования: Д.А. Тарасов. Применение условной оптимизации для определения допустимых нагрузок на изгибно-жесткие нити. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022; 49(4):169-176. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-4-169-176

**Applying conditional optimization to determine the allowable loads
on flexurally rigid threads**

D.A. Tarasov

Penza State University,
40 Krasnaya Str., Penza 440026, Russia

Abstract. Objective. Development of a methodology for determining the allowable loads on existing structural elements, the design model of which is a flexural-rigid thread, based on the requirements of strength and rigidity due to the changed operating conditions of structures. **Method.** This study is based on mathematical modeling of the problem of conditional optimization. The objec-

tive function is the total potential energy of deformation of a thread with some flexural rigidity. In this case, restrictions are imposed on strength, rigidity, and the condition of continuity of deformations. At the same time, to achieve this goal, the provisions of the strength of materials, as well as the apparatus of integral and differential calculation of functions of one or more variables, were used. **Result.** An assessment of the adequacy of the results obtained using the developed methodology was carried out. A numerical experiment was performed to determine the value of the allowable uniformly distributed load and the corresponding distribution of stresses and strains along the length of a thread of finite stiffness with given physical and geometric parameters. It has been established that the discrepancies in the values of the results obtained using the proposed modeling technology and the commercial computer-aided design and calculation system LIRA 10.8, implemented on the generally recognized finite element method, are no more than 5%. **Conclusion.** The developed technique allows setting and solving problems of determining the ultimate loads on flexural-rigid threads, based on the allowable stresses and strains, in contrast to existing commercial computer simulation systems that solve exclusively direct problems of determining the stress-strain state of various types of structures. It can be used at the stage of inspection of large-span coatings in the reconstruction of public buildings and engineering structures.

Keywords: conditional optimization, permissible load, flexural-rigid thread, inverse problem, geometric nonlinearity, calculation by deformed scheme

For citation: D.A. Tarasov. Applying conditional optimization to determine the allowable loads on flexurally rigid threads. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2022; 49(4):169-176. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-4-169-176

Введение. В настоящее время в строительной практике при реконструкции зданий и инженерных сооружений довольно часто меняется функциональное назначение объекта, а соответственно его объемно-планировочные и конструктивные решения [1]. Это приводит к изменению эксплуатационных нагрузок, а также геометрических характеристик и вариантов сопряжения несущих элементов. Безусловно, в таком случае меняются расчетные модели составных частей рассматриваемых механических систем а, следовательно, и распределение напряжений и деформаций по их длине. Наряду с этим в результате обследования могут уточняться физико-механические характеристики материалов использованных при строительстве. Такого рода изменения в условиях работы конструкций требуют оценки предельных нагрузок, способных воспринимать существующими элементами, исходя из допускаемых напряжений и деформаций, за пределами которых невозможна нормальная эксплуатация объекта в дальнейшем [2, 3].

Постановка задачи. Необходимо разработать методику, позволяющую определять допустимую нагрузку на изгибно-жесткую нить, исходя из требований прочности и жесткости. Под допустимой нагрузкой понимается нагрузка, при действии которой в заданной точке по длине нити в наиболее напряженном крайнем волокне сечения нормальные напряжения достигают значения предела текучести материала, либо вертикальные перемещения становятся равны заданному пределу. В свою очередь под изгибно-жесткой нитью понимается элемент, при внешнем силовом воздействии совмещающий в себе работу гибких нитей, способных сопротивляться исключительно растяжению, и балок, работающих только на изгиб [4, 5].

Предметом исследования является методика, позволяющая достичь поставленной цели. Объектом исследования выступают конструктивные элементы, обеспечивающие общую прочность большепролетных покрытий общественных зданий и инженерных сооружений, расчетной моделью которых является изгибно-жесткая нить [6, 7, 8].

Методы исследования. Рассмотрим представленную на рис. 1 нить, сечением A , с первоначальным провесом f_0 в середине пролета l , имеющую определенную изгибную жесткость $E \cdot J$. Равномерно-распределенная нагрузка q действует на произвольном участке шириной d по длине рассматриваемого элемента. Горизонтальные перемещения крайних сечений изгибно-жесткой нити ограничены упругоподатливыми опорами с жесткостью i . Хорда AB , соединяю-

щая точки крепления расположена к горизонту под углом β .

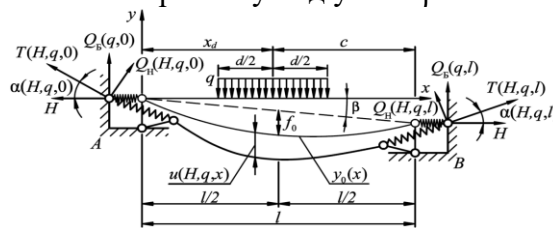


Рис.1. Расчетная модель изгибно-жесткой нити
Fig.1. Calculation model of a flexural-rigid thread

В качестве целевой функции примем полную потенциальную энергию деформации изгибно-жесткой нити [9, 10, 11]. В параметры целевой функции, наряду с максимально-допустимой нагрузкой q , необходимо добавить распор H . Ввиду того, что нить конечной жесткости совмещает в себе свойства гибких нитей, то в ней при внешнем силовом воздействии возникает распор, непосредственно зависящий от деформированного состояния рассматриваемого элемента, которое в свою очередь, вызвано искомой предельной нагрузкой. Целевая функция примет вид [12]:

$$U(H, q) = \int_0^l \frac{M_n(H, q, x)^2}{2 \cdot E \cdot J} dx + \int_0^l \frac{T(H, q, x)^2}{2 \cdot E \cdot A} dx + \int_0^l \frac{k \cdot Q_n(H, q, x)^2}{2 \cdot G \cdot A} dx \rightarrow \max, \quad (1)$$

где H – распор, Н; q – равномерно-распределенная нагрузка, Н/м; l – пролет, м; $M_n(H, q, x)$ – функция изгибающего момента, Н·м; x – текущая абсцисса, м; E – модуль упругости материала, Па; J – момент инерции сечения, м⁴; $T(H, q, x)$ – функция растягивающего продольного усилия, Н; A – площадь поперечного сечения, м²; k – коэффициент характеризующий форму поперечного сечения; $Q_n(H, q, x)$ – функция поперечной силы, Н; G – модуль сдвига, Па.

При этом аргументы целевой функции должны удовлетворять ограничению по прочности в виде неравенства [13]:

$$\sigma(H, q, x_1) \leq \sigma_T, \quad (2)$$

где $\sigma(H, q, x_1)$ – значение функции нормальных напряжений в заданном сечении с абсциссой x_1 , Па; σ_T – предел текучести материала, Па.

Вместе с тем может накладываться ограничение по допустимым вертикальным перемещениям [13]:

$$u(H, q, x_2) \leq [u] \quad (3)$$

где $u(H, q, x_2)$, $[u]$ – значение и предельно допустимое значение прогиба в заданном сечении с абсциссой x_2 , м.

Для определения значения распора, добавим в систему ограничений условие неразрывности деформаций вдоль продольной оси изгибно-жесткой нити [14, 15, 16]:

$$L_0 + \Delta L(H, q) = L(H, q), \quad (4)$$

где L_0 – длина до приложения нагрузки, м; $\Delta L(H, q)$ – упругая деформация, м; $L(H, q)$ – длина после приложения нагрузки, м.

Далее с целью создания возможности решить поставленную задачу условной оптимизации, запишем все члены, составляющие целевую функцию и ограничения, представляющие собой уравнения в виде равенств и не равенств.

Изгибающий момент в какой-либо произвольной точке по длине нити конечной жесткости равен сумме изгибающих моментов всех сил, действующих на нее по одну сторону от рассматриваемого поперечного сечения с абсциссой x . Тогда получим:

$$M_n(H, q, x) = M_B(q, x) - H \cdot (y_0(x) + x \cdot \operatorname{tg} \beta + u(H, q, x)), \quad (5)$$

где $M_B(q, x)$ – функция балочного изгибающего момента, Н·м; $y_0(x)$ – функция линии начального очертания, м; β – угол наклона хорды AB , град; $u(H, q, x)$ – функция прогиба, м.

Из рис. 1 графически можно установить, что растягивающее изгибно-жесткую нить продольное усилие равно сумме проекций балочной поперечной силы и распора на касательную к линии конечного очертания. Математически записывается это так:

$$T(H, q, x) = Q_B(q, x) \cdot \sin \alpha(H, q, x) + H \cdot \cos \alpha(H, q, x), \quad (6)$$

где $Q_B(q, x)$ – функция балочной поперечной силы, Н; $\alpha(H, q, x)$ – угол между осью абсцисс и касательной в произвольной точке к линии конечного очертания, град.

Поперечная сила, воспринимаемая нитью, обладающей некоторой изгибной жесткостью, определяется из равновесия всех сил, приложенных по одну сторону на нормаль к касательной линии конечного очертания, проведенную в точке с абсциссой x . Откуда имеем:

$$Q_H(H, q, x) = Q_B(q, x) \cdot \cos \alpha(H, q, x) - H \cdot \sin \alpha(H, q, x). \quad (7)$$

Определение функций балочного изгибающего момента и балочной поперечной силы не вызывает затруднений и ведется методом сечений по формулам:

$$\begin{aligned} M_B(q, x) = & \frac{q \cdot d \cdot c}{l} \cdot x \cdot (x \geq 0) - \\ & - q \cdot \frac{\left[x - \left(x_d - \frac{d}{2} \right) \right]^2}{2} \cdot \left(x > x_d - \frac{d}{2} \right) + \\ & + q \cdot \frac{\left[x - \left(x_d + \frac{d}{2} \right) \right]^2}{2} \cdot \left(x > x_d + \frac{d}{2} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} Q_B(q, x) = & \frac{q \cdot d \cdot c}{l} \cdot (x \geq 0) - \\ & - q \cdot \left[x - \left(x_d - \frac{d}{2} \right) \right] \cdot \left(x > x_d - \frac{d}{2} \right) + \\ & + q \cdot \left[x - \left(x_d + \frac{d}{2} \right) \right] \cdot \left(x > x_d + \frac{d}{2} \right) \end{aligned} \quad (9)$$

где d – ширина зоны приложения нагрузки, м; c – расстояние от центра зоны приложения нагрузки до опоры B , м; x_d – абсцисса центра зоны приложения нагрузки, м.

Линия очертания нити конечной жесткости до приложения нагрузки описывается с достаточной степенью точности квадратичной функцией:

$$y_0(x) = \frac{4 \cdot f_0}{l^2} \cdot x^2 - \frac{4 \cdot f_0}{l} \cdot x - x \cdot \operatorname{tg} \beta, \quad (10)$$

f_0 – первоначальная стрела провеса в середине пролета, м.

Тригонометрические функции угла между осью абсцисс и касательной в произвольной точке к линии конечного очертания изгибно-жесткой нити, образованной после приложения нагрузки, определяются из геометрических построений [10]:

$$\sin \alpha(H, q, x) = \frac{\frac{d}{dx}(y_0(x) + u(H, q, x))}{\sqrt{1 + \left(\frac{d}{dx}(y_0(x) + u(H, q, x)) \right)^2}}; \quad (11)$$

$$\cos \alpha(H, q, x) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{d}{dx}(y_0(x) + u(H, q, x)) \right)^2}}. \quad (12)$$

Для нахождения функции прогиба необходимо решить дифференциальное уравнение (13), ранее полученное в работе [17]:

$$E \cdot J \cdot \frac{d^2}{dx^2} u(H, q, x) - M_B(q, x) + H \cdot (y_0(x) + x \cdot \operatorname{tg} \beta + u(H, q, x)) = 0. \quad (13)$$

Расчет ведется при заданных граничных условиях $u(H, q, 0) = 0$ и $u(H, q, l) = 0$ методом последовательных приближений. Длина изгибно-жесткой нити до приложения нагрузки равна

длине дуги кривой, соединяющей ее точки крепления, и определяется по известной формуле из дифференциальной геометрии [18]:

$$L_0 = \int_0^l \sqrt{1 + \left(\frac{d}{dx} y_0(x) \right)^2} dx. \quad (14)$$

В результате действия нагрузки, нить конечной жесткости удлинится на величину:

$$\Delta L(H, q) = \frac{H}{E \cdot A} \cdot \int_0^l \left[1 + \left(\frac{Q_b(q, x) - Q_n(H, q, x)}{H} + \operatorname{tg} \beta \right)^2 \right] dx. \quad (15)$$

Длина соответствующая конечному состоянию нити равна:

$$L(H, q) = \int_0^{l - \frac{2}{i} H} \sqrt{1 + \left(\frac{d}{dx} (y_0(x) + u(H, q, x)) \right)^2} dx, \quad (16)$$

где i – жесткость упругоподатливых опор, Н/м.

Нормальные напряжения, возникающие в крайних волокнах сечений по длине нити, определяются по выражениям [19]:

$$\sigma_{\max}(H, q, x) = \frac{T(H, q, x)}{A} + \left| \frac{M_n(H, q, x)}{W} \right|; \quad (17)$$

$$\sigma_{\min}(H, q, x) = \frac{T(H, q, x)}{A} - \left| \frac{M_n(H, q, x)}{W} \right|. \quad (18)$$

W – момент сопротивления сечения, м³.

Обсуждение результатов. Для оценки адекватности результатов, получаемых с помощью разработанной технологии моделирования, выполним ряд вычислительных экспериментов по определению допустимой нагрузки на нить конечной жесткости и напряженно-деформированного состояния, вызванного искомой величиной внешнего воздействия. В качестве объекта исследования для вычислительных экспериментов рассмотрим изгибно-жесткую нить, представляющую собой трубу, выполненную из стали с пределом текучести $\sigma_T = 300$ МПа, наружным диаметром $D = 0,55$ м и толщиной стенки $t = 0,025$ м, пролетом $l = 12$ м. Угол наклона хорды, соединяющей точки крепления $\beta = 5$ град, первоначальный провес $f_0 = 1$ м, жесткость упругоподатливых опор $k = 100$ МН/м.

Предполагается, что равномерно-распределенная нагрузка приложена к правой половине пролета. Таким образом, ширина зоны действия и абсцисса ее центра соответственно равны $d = 6$ м, $x_d = 9$ м. Сечение, где возникающие от внешнего воздействия нормальные напряжения ограничены пределом текучести материала, задано на расстоянии $2/3$ от пролета – $x_1 = 8$ м. Условие по допускаемым вертикальным перемещениям отсутствует. В первую очередь, проведем вычислительный эксперимент с помощью предложенной технологии моделирования. В ходе решения при заданных геометрических и физических параметрах изгибно-жесткой нити, а также ограничении на развитие пластических деформаций в материале, получено значение максимально-допустимой нагрузки $q = 239,003$ кН/м. Вместе с тем, наряду с найденным значением, определено напряженно-деформированное состояние, обусловленное данной нагрузкой. Распределение максимальных и минимальных нормальных напряжений, а также вертикальных перемещений по длине нити, представлено в виде эпюр на рис. 2а, 3а, 4а. Выполним численное моделирование с помощью коммерческой системы автоматизированного проектирования и расчета ЛИРА версии 10.8 релиз 3.6 в основу, которой положен общепризнанный метод конечных элементов [20]. Ввиду того, что подобные компьютерные системы направлены на решение прямых задач, определим напряженно-деформированное состояние объекта исследования при действии предельной нагрузки, ранее найденной с помощью технологии моделирования [21]. Напряжения и деформации (рис. 2б, 3б, 4б), рассчитанные на данном этапе, выступают в роли критериев оценки адекватности результатов, полученных способом, предложенным в данной работе.

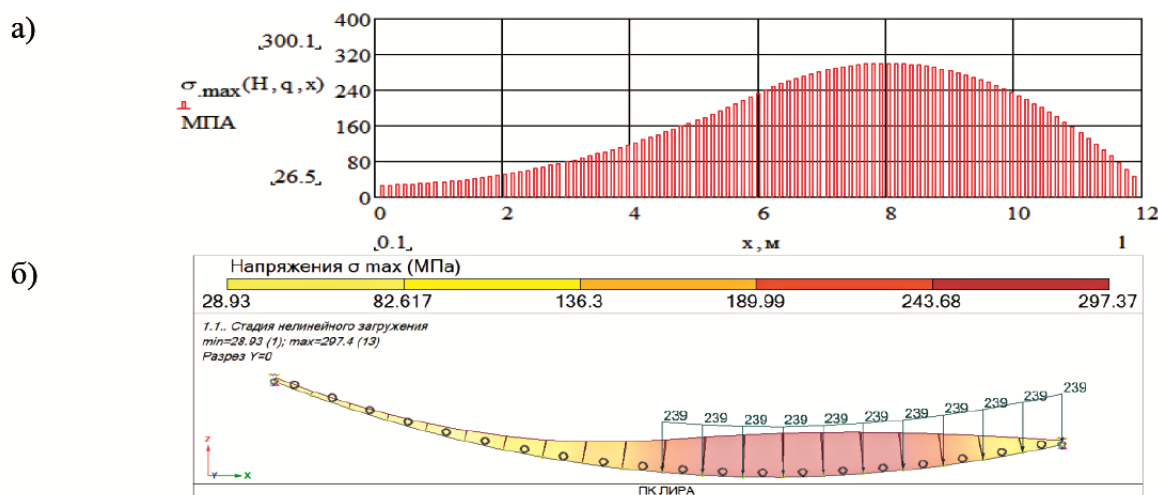


Рис.2. Эпюры максимальных нормальных напряжений: а – предложенная методика; б – метод конечных элементов

Fig.2. Plot of maximum normal stresses: a – proposed method; b – finite element method

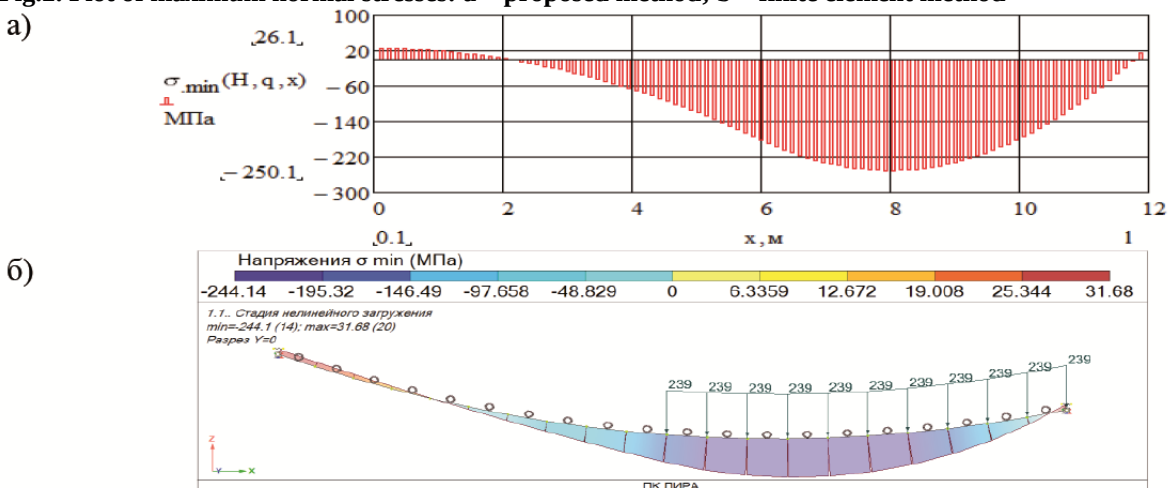


Рис.3. Эпюры минимальных нормальных напряжений:

а – предложенная методика; б – метод конечных элементов

Fig.3. Plot of minimum normal stresses: a – proposed method; b – finite element method

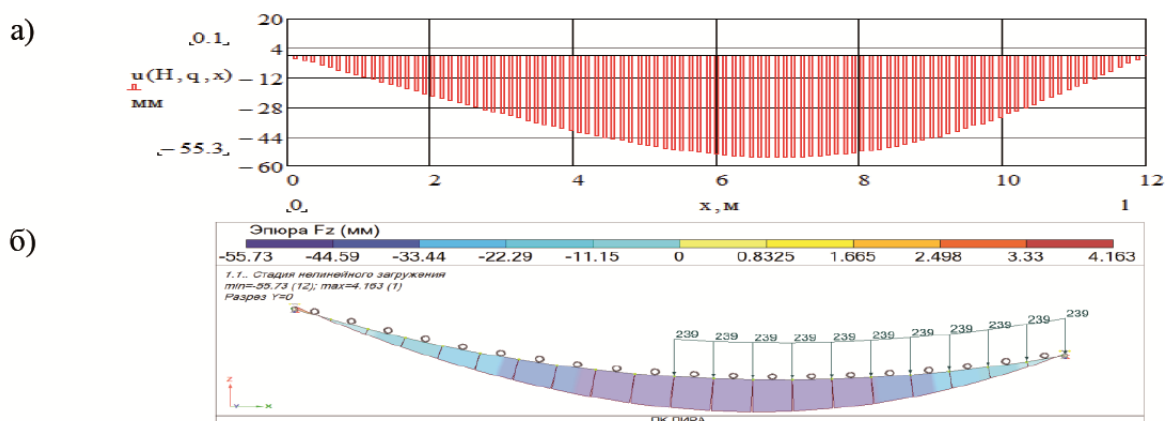


Рис.4. Эпюры вертикальных перемещений:

а – предложенная методика; б – метод конечных элементов

Fig.4. Plot of vertical displacements: a – proposed method; b – finite element method

Моделирование нити, обладающей заданной изгибной жесткостью, в программном комплексе ЛИРА велось 20 геометрически нелинейными конечными элементами стержня сильного изгиба – тип 309. Упругоподатливые опоры представляли собой одноузловые конечные элементы упругой связи по направлению глобальной оси X – тип 56. Метод приложения нагрузки

осуществлялся с автоматическим выбором шага. В табл. 1 представлены критерии, характеризующие адекватность, определяемой с помощью разработанной технологии моделирования, допустимой нагрузки и соответствующего напряженно-деформированного состояния изгибно-жесткой нити. Из табл.1 видно, что расхождения в значениях принятых критериев, полученных общепризнанным методом конечных элементов и предложенным способом не существенны.

Таблица 1. Критерии оценки результатов моделирования

Table 1. Criteria for evaluating simulation results

Критерий оценки Evaluation criteria	Предложенная методика Suggested methodology	МКЭ FEM	Расхождение значений, % Discrepancy values, %
Максимальные нормальные напряжения, МПа Maximum normal stresses, MPa	300,1	297,37	0,91
Минимальные нормальные напряжения, МПа Minimum normal stresses, MPa	-250,1	-244,14	2,38
Максимальный прогиб, мм Maximum deflection, mm	-55,3	-55,73	0,77

Вывод. Представлена методика, позволяющая определять предельную нагрузку на нити, обладающие некоторой изгибной жесткостью, исходя из допускаемых напряжений и деформаций. В основу данного исследования положено математическое моделирование задачи условной оптимизации, решение которой может быть получено одним из известных способов, например методом множителей Лагранжа.

В качестве целевой функции выступает потенциальная энергия деформации нити конечной жесткости. При этом накладываются ограничения по прочности, жесткости и условию неразрывности деформаций. Проведен вычислительный эксперимент по определению значения допустимой равномерно-распределенной нагрузки и соответствующему напряженно-деформированному состоянию изгибно-жесткой нити с заданными физическими и геометрическими параметрами. Установлено, что расхождения в значениях результатов, полученных с помощью предложенной методики и общепризнанного метода конечных элементов, составляют не более 5%, что является хорошим показателем для инженерных расчетов.

Библиографический список:

1. Снегирева, А. И. К вопросу обследования строительных конструкций, зданий и сооружений / А. И. Снегирева, В. Г. Мурашкин // Эксперт: теория и практика. – 2021. – № 6(15). – С. 45-51. – DOI 10.51608/26867818_2021_6_45.
2. Перельмутер, А. В. Использование критерия отпорности для оценки предельного состояния конструкции / А. В. Перельмутер // Вестник МГСУ. – 2021. – Т. 16. – № 12. – С. 1559-1566. – DOI 10.22227/1997-0935.2021.12.1559-1566
3. Перельмутер, А. В. Обратные задачи строительной механики. Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2020. – Т. 22. – № 4. – С. 83-101. – DOI 10.31675/1607-1859-2020-22-4-83-101.
4. Аверин, А. Н. Расчетные модели гибких нитей// Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2020. – № 9(741). – С. 5-19. – DOI 10.32683/0536-1052-2020-741-9-5-19.
5. Аверин, А. Н. Малые колебания жесткой нити вблизи статического положения равновесия // Строительная механика и конструкции. – 2018. – № 2(17). – С. 53-66.
6. P. G. Ereemeev, I. I. Vedyakov, A. I. Zvezdov . Suspension Large Span Roofs Structures in Russia. International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2021;17(2): 34-42. – DOI 10.22337/2587-9618-2021-17-2-34-41.
7. Jia, L., Zhang, C., Jiang, Y. et al. Simplified Calculation Methods for Static Behaviors of Triple-Tower Suspension Bridges and Parametric Study. Int J Steel Struct 18, 685–698 (2018). <https://doi.org/10.1007/s13296-018-0028-8>.
8. Agwoko, M.P., Chen, Z. & Liu, H. Experimental and Numerical Studies on Dynamic Characteristics of Long-Span Cable-Supported Pipe Systems. Int J Steel Struct 21, 274–298 (2021). <https://doi.org/10.1007/s13296-020-00438-x>.
9. Л. Ю. Ступишин, М. Л. Мошквич. Задача об определении "слабого звена" в конструкции на основе критерия критических уровней энергии // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2021. – № 2(746). – С. 11-23. – DOI 10.32683/0536-1052-2021-746-2-11-23.
10. Ступишин, Л. Ю. Прогрессирующее предельное состояние конструкций на критических уровнях внутренней потенциальной энергии деформации// Вестник МГСУ. – 2021. – Т. 16. – № 10. – С. 1324-1336. – DOI 10.22227/1997-0935.2021.10.1324-1336.
11. Л. Ю. Ступишин, М. Л. Мошквич. Решение задач об изгибе балки на основе вариационного критерия критических уровней энергии // Вестник МГСУ. – 2021. – Т. 16. – № 3. – С. 306-316. – DOI 10.22227/1997-0935.2021.3.306-316.
12. Мищенко, А. В. Оптимизация структурно-неоднородных стержневых конструкций на основе энергетического критерия // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2021. – № 6(750). – С. 20-32. – DOI 10.32683/0536-1052-2021-750-6-20-32.
13. Тарасов Д. А. Параметрическая оптимизация изгибно-жестких нитей при заданных допустимых напряжениях и деформациях // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2022. № 2(40). С. 5-10. DOI 10.52684/2312-3702-2022-40-2-5-10.
14. Jiang, Z., Liu, X., Shi, K. et al. Catenary Equation-Based Approach for Force Finding of Cable Domes. Int J Steel Struct 19, 283–292 (2019). <https://doi.org/10.1007/s13296-018-0117-8>.
15. Liu, Z., Jiang, A., Shao, W. et al. Artificial-Neural-Network-Based Mechanical Simulation Prediction Method for Wheel-Spoke Cable Truss Construction. Int J Steel Struct 21, 1032–1052 (2021). <https://doi.org/10.1007/s13296-021-00488-9>.

16. Mathematical modeling of the stress-strain state of flexible threads with regard to plastic deformations / D. Tarasov, V. Kononov, V. Zaitsev, Y. Rodionov. *Journal of Physics: Conference Series* : 4, Tambov, 15–17 ноября 2017 года. – Tambov, 2018: 012008. – DOI 10.1088/1742-6596/1084/1/012008.
17. Тарасов, Д. А. Алгоритм моделирования напряженно-деформированного состояния изгибно-жестких нитей / Д. А. Тарасов, Н. Ю. Митрохина, Е. В. Маньченкова // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2022. – № 1(41). – С. 82-93. – DOI 10.21685/2227-8486-2022-1-9.
18. Song, T., Wang, B. & Song, Y. A Simplified Calculation Method for Multi-Tower Self-Anchored Suspension Bridges Based on Frame Structure Theory Model. *Int J Steel Struct* 22, 373–388 (2022). <https://doi.org/10.1007/s13296-022-00581-7>.
19. Семенов, В. В. Расчет гибких стержней на продольно-поперечный изгиб / В. В. Семенов, Х. Уламбаяр // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. – 2018. – Т. 8. – № 2(25). – С. 148-158.
20. Карпунин, В. Г. Компьютерное моделирование строительных конструкций зданий и сооружений / В. Г. Карпунин, Е. А. Голубева // Архитектон: известия вузов. – 2019. – № 4(68). – С. 17. – EDN OQTWNE.
21. А. Г. Тамразян, А. В. Алексейцев. Современные методы оптимизации конструктивных решений для несущих систем зданий и сооружений // Вестник МГСУ. – 2020. – Т. 15. – № 1. – С. 12-30. – DOI 10.22227/1997-0935.2020.1.12-30.

References:

1. A. I. Snegireva, V. G. Murashkin On the issue of inspection of building structures, buildings and structures.. *Expert: theory and practice*. 2021; (15): 45-51. – DOI 10.51608/26867818_2021_6_45 [In Russ]
2. Perelmuter, A.V. The use of the resistance criterion to assess the limiting state of the structure / A.V. Perelmuter. *Bulletin of MGSU*. 2021; 16(12):1559-1566. – DOI 10.22227/1997-0935.2021.12.1559-1566. [In Russ]
3. Perelmuter, A.V. Inverse problems of structural mechanics. *Bulletin of the Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering*. 2020;22(4):83-101. – DOI 10.31675/1607-1859-2020-22-4-83-101. [In Russ]
4. Averin, A. N. Computational models of flexible threads. *News of higher educational institutions. Construction*. 2020;9(741):5-19. – DOI 10.32683/0536-1052-2020-741-9-5-19. [In Russ]
5. Averin, A. N. Small vibrations of a rigid thread near a static equilibrium position. *Construction mechanics and constructions*. 2018; 2(17): 53-66. [In Russ]
6. P. G. Eremeev, I. I. Vedyakov, A. I. Zvezdov Suspension Large Span Roofs Structures in Russia. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2021; 17(2):34-42. DOI 10.22337/2587-9618-2021-17-2-34-41. [In Russ]
7. Jia, L., Zhang, C., Jiang, Y. et al. Simplified Calculation Methods for Static Behaviors of Triple-Tower Suspension Bridges and Parametric Study. *Int J Steel Struct* 18, 685–698 (2018). <https://doi.org/10.1007/s13296-018-0028-8>.
8. Agwoko, M.P., Chen, Z. & Liu, H. Experimental and Numerical Studies on Dynamic Characteristics of Long-Span Cable-Supported Pipe Systems. *Int J Steel Struct* 21, 274–298 (2021). <https://doi.org/10.1007/s13296-020-00438-x>.
9. L. Yu. Stupishin, M. L. Moshkevich. The problem of determining the "weak link" in the design based on the criterion of critical energy levels. *Izvestiya vyshevykh uchebnykh zavedenii. Construction*. 2021; 2(746):11-23. [In Russ]
10. Stupishin, L. Yu. Progressive limiting state of structures at critical levels of internal potential energy of deformation *Bulletin of MGSU*. 2021; 16(10): 1324-1336. – DOI 10.22227/1997-0935.2021.10.1324-1336. [In Russ]
11. Stupishin, L. Yu. Solving problems of beam bending based on the variational criterion of critical energy levels / L. Yu. Stupishin, M. L. Moshkevich. *Bulletin of MGSU*. 2021;16(3): 306-316. DOI 10.22227/1997-0935.2021.3.306-316. [In Russ]
12. Mishchenko, A.V. Optimization of structurally inhomogeneous rod structures based on the energy criterion / A.V. Mishchenko. *News of higher educational institutions. Construction*. 2021;6(750):20-32. – DOI 10.32683/0536-1052-2021-750-6-20-32.
13. D. A. Tarasov. Parametric optimization of flexural-rigid threads at given allowable stresses and strains. *Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Sea*. 2022; (40): 5-10. – DOI 10.52684/2312-3702-2022-40-2-5-10. [In Russ]
14. Jiang, Z., Liu, X., Shi, K. et al. Catenary Equation-Based Approach for Force Finding of Cable Domes. *Int J Steel Struct* 19, 283–292 (2019). <https://doi.org/10.1007/s13296-018-0117-8>.
15. Liu, Z., Jiang, A., Shao, W. et al. Artificial-Neural-Network-Based Mechanical Simulation Prediction Method for Wheel-Spoke Cable Truss Construction. *Int J Steel Struct* 21, 1032–1052 (2021). <https://doi.org/10.1007/s13296-021-00488-9>.
16. Mathematical modeling of the stress-strain state of flexible threads with regard to plastic deformations / D. Tarasov, V. Kononov, V. Zaitsev, Y. Rodionov. *Journal of Physics: Conference Series* : 4, Tambov, 15–17 ноября 2017 года. – Tambov, 2018: 012008. – DOI 10.1088/1742-6596/1084/1/012008. [In Russ]
17. D. A. Tarasov, N. Y. Mitrokhina, E. V. Manchenkova Algorithm for modeling the stress-strain state of flexural rigid threads. *Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2022; 1(41): 82-93. DOI 10.21685/2227-8486-2022-1-9. [In Russ]
18. Song, T., Wang, B. & Song, Y. A Simplified Calculation Method for Multi-Tower Self-Anchored Suspension Bridges Based on Frame Structure Theory Model. *Int J Steel Struct* 22, 373–388 (2022). <https://doi.org/10.1007/s13296-022-00581-7>.
19. V. V. Semenov, H. Ulambayar. Calculation of flexible rods for longitudinal-transverse bending. *Izvestiya vuzov. Investment. Construction. Realty*. 2018;8(2(25):148-158.
20. V. G. Karpunin, E. A. Golubeva. Computer modeling of building structures of buildings and structures. *Architecton: izvestiya vuzov*. 2019; 4(68): 17. [In Russ]
21. A. G. Tamrazyan, A.V. Aleksetsev. Modern methods of optimization of constructive solutions for load-bearing systems of buildings and structures. *Vestnik MGSU*. 2020; 15(1):12-30. DOI 10.22227/1997-0935.2020.1.12-30[In Russ].

Сведения об авторе:

Тарасов Денис Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизированные системы безопасности»; tda82@list.ru ORCID 0000-0001-7685-0325

Information about author:

Denis A. Tarasov Cand.Sci. (Eng), Assoc. Prof., Department of Automated Security Systems; tda82@list.ru ORCID 0000-0001-7685-

0325

Конфликт интересов/Conflict of interest

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

Поступила в редакцию/ Received 30.10.2022.

Одобрена после рецензирования / Revised 20.11.2022.

Принята в печать/ Accepted for publication 20.11.2022.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 536.621.1

DOI: 10.21822/2073-6185-2022-49-4-177-181

Оригинальная статья /Original Paper

Математическое моделирование процессов испарения в контуре теплового насоса

В.Н. Федосеев¹, С.А. Логинова²

¹Ивановский государственный политехнический университет,

¹153000, г. Иваново, Шереметевский пр-кт, 21, Россия,

²Ярославский государственный технический университет,

²150023, г. Ярославль, Московский пр-кт, 88, Россия

Резюме. Цель. В целях совершенствования системы управления воздушным тепловым насосом и повышения его эффективности необходимо с высокой точностью учесть все элементарные стадии процессов, протекающих в рассматриваемой системе. **Метод.** Математическое описание тепломассообменных процессов, протекающих в испарительной линии воздушного теплового насоса. **Результат.** Рассмотрен тепломассообменный процесс испарения хладагента из кипящей рабочей жидкости теплового насоса. Проведен численный эксперимент по определению размеров капель хладагента, которые могут вылетать из кипящей жидкости фреона при работе теплового насоса. Капли размером в диаметре менее 1 мм успевают испариться в паровом потоке за время движения от зоны кипения (дросселя) до каплеуловителя, расположенного перед компрессором. **Вывод.** Результаты исследования позволяют разработать модели тепломассообменных процессов для оптимизации режимов работы воздушных тепловых насосов.

Ключевые слова: кинетика, хладагент, математическая модель, тепловой насос

Для цитирования: В.Н. Федосеев, С.А. Логинова. Математическое моделирование процессов испарения в контуре теплового насоса. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022;49(4):177-181. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-4-177-181

Mathematical modeling of evaporation processes in a heat pump circuit

V.N. Fedoseev¹, S.A. Loginova²

¹Ivanovo State Polytechnic University,

¹21 Sheremetevsky Ave., Ivanovo 153000, Russia,

²Yaroslavl State Technical University,

²88 Moskovsky Ave., Yaroslavl 150023, Russia

Abstract. Objective. In order to improve the control system of an air heat pump and increase its efficiency, it is necessary to take into account as accurately as possible all the elementary stages of the processes occurring in the system under consideration. The article discusses in detail the heat and mass transfer process of evaporation of the refrigerant from the boiling working fluid of a heat pump. **Method.** Description of heat and mass transfer processes occurring in the evaporator line of an air heat pump. **Result.** A numerical experiment was carried out to determine the size of the refrigerant droplets that can fly out of the boiling freon liquid during the operation of the heat pump. The calculations performed showed that droplets with a diameter of less than 1 mm have time to evaporate in the vapor flow during the movement from the boiling zone to the droplet eliminator located in front of the compressor. **Conclusion.** Research will make it possible to develop recommendations for the design of the droplet collection unit, as well as to develop models for optimizing the operating modes of air source heat pumps.

Keywords: kinetics, refrigerant, mathematical model, heat pump

For citation: V.N. Fedoseev, S.A. Loginova. Mathematical modeling of evaporation processes in a heat pump circuit. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science. 2022; 49 (4):177-181. DOI: 10.21822 /2073-6185-2022-49-4-177-181

Введение. В целях повышения эффективности использования воздушных тепловых насосов для расчета трансформации теплоты в реальных неравновесных условиях необходимо знать свойства рабочих веществ и их параметры в различных состояниях. Для того чтобы оценить все термодинамические процессы воздушной теплохолодильной системы воздушного теп-

лового насоса и произвести расчеты, как правило, используют тепловые диаграммы, предлагаемые производителями [1]. В результате расчетов получают значения тепловой энергии, изымаемой рабочим телом в процессе его непрерывного фазового превращения: кипение, испарение, конденсация, определяемые по точкам состояния энтальпии на соответствующих участках контура воздушной теплонасосной системы.

Постановка задачи. Расчет парокомпрессионного цикла подбирается по заданным внешним условиям воздуха, уровнем подогрева теплоносителя (воды) и экологически безопасным хладагентом воздушного теплового насоса. Принцип расчета цикла фреонового контура, основанный на передаче тепла за счет только фазовых переходов рабочего вещества «жидкость - парожидкостная смесь – газ» без анализа внутреннего состояния переходного процесса кипящего фреона, не учитывает динамику и эффективность прохождения потока. В связи с этим была предпринята попытка математического описания тепломассообменных процессов, протекающих в испарительной линии воздушного теплового насоса. Изучение и моделирование процессов, протекающих в контурах тепловых насосов, проводится на основе теоретических представлений технической термодинамики [1-3]. К настоящему времени имеется ряд математических описаний теплообменных процессов, протекающих в контурах воздушного теплового насоса, сопровождаемых явлениями фазовых превращений (кипение и конденсация) хладагента [4, 5, 6-8]. Недостатком данных моделей является упрощенное рассмотрение стадии испарения хладагента в контуре теплового насоса, что может приводить к ошибочным результатам расчетов. В квазистационарном режиме цикла работы воздушного теплового насоса [2, 3] определяющее влияние на процесс тепломассообмена компрессионного цикла оказывают условия взаимосвязанности испарительной и конденсационной ветвей циркуляционного контура. Для развития динамики системы управления воздушным тепловым насосом и повышения его эффективности необходимо как можно более точно учитывать все элементарные стадии испарительных процессов, протекающих в рассматриваемой системе [4]. Одной из таких элементарных стадий является тепломассообменный процесс испарения хладагента из кипящей рабочей жидкости теплового насоса.

Методы исследования. Известно, что при открытии дросселя протекает процесс вскипания хладагента, сопровождаемый резким падением давления. Этот процесс сопровождается парообразованием [5]. При этом критический размер пузырьков пара определяется следующим выражением:

$$R_{кр.} = \frac{2\sigma \cdot T(\rho_{ж} - \rho_n)}{r^* \cdot \rho_n \cdot \rho_{ж} \cdot \Delta T} \quad (1)$$

где: σ – коэффициент поверхностного натяжения, Н/м; $\rho_n, \rho_{ж}$ – плотности жидкости и пара при условиях испарения, кг/м³; r^* – скрытая теплота парообразования, Дж/кг; ΔT – разность температур между стенкой трубки и потока пара, °С.

Испарение жидкой фазы в образовавшемся при кипении пузырьке приводит к разрыву плёнки и её распаду на капли. Теоретические и экспериментальные результаты исследования процессов, опубликованные в зарубежной и отечественной литературе, не содержат сведений подобного характера [9-11, 12]. Однако можно с высокой степенью вероятности предположить, что распределение образующихся капель по размерам может характеризоваться функцией Гаусса в виде:

$$f(r) = \frac{1}{\sigma_r \sqrt{2\pi}} \cdot \exp \left[-\frac{r - m_r}{2\sigma_r^2} \right] \quad (2)$$

где: m_r – математическое ожидание; σ_r – среднеквадратичное отклонение.

Капли размером $r > r_{max}$ не будут уноситься потоком пара, а возвратятся в массив кипящей жидкости. Максимальный размер капель определяется из условия витания [4]:

$$Re_{внт} = \frac{Ar}{18 + 0,61\sqrt{Ar}} \quad (3)$$

Здесь: $Re_{внт}$ – критерий Рейнольдса для режима витания:

$$Re_{внт} = \frac{2w \cdot r_{max}}{\nu} \quad (4)$$

- критерий Архимеда

$$\sqrt{Ar} = \frac{g \cdot (2r_{\max})^3}{\nu^2} \cdot \frac{\rho_{\text{жс}} - \rho_n}{\rho_n} \quad (5)$$

В результате величина $r_{\max}$ будет определяться по формуле:

$$r_{\max} = \sqrt{\frac{\frac{W}{A^* \cdot \nu}}{36 + 1,22 \cdot \sqrt{A^*} \cdot \sqrt{r_{\max}^3}}} \quad (6)$$

$$A^* = \frac{8 \cdot g}{\nu^2} \cdot \frac{\rho_{\text{жс}} - \rho_n}{\rho_n} \quad (7)$$

где: A^* – размерный физический симплекс, $1/\text{м}^3$; ν – кинематический коэффициент вязкости пара, $\text{м}^2/\text{с}$; g – ускорение свободного падения, $\text{м}^2/\text{с}$; $\rho_n, \rho_{\text{жс}}$ – плотности жидкости и пара при условиях испарения, $\text{кг}/\text{м}^3$; W – средняя расходная скорость пара в линии испарения, $\text{м}/\text{с}$.

Уравнение кинетики изменения размера капли может быть представлено следующим образом:

$$\frac{dr_k}{d\tau} = -\frac{3\beta}{\rho_{\text{жс}}} \cdot (P_n - P_{\text{ср}}) \quad (8)$$

где: P_n – парциальное давление насыщенного пара над поверхностью капли, Па; $P_{\text{ср}}$ – давление пара в среде, Па; β – коэффициент массоотдачи в паровой фазе, $\text{с}/\text{м}$.

Значение коэффициента массоотдачи для единичной капли определяется выражением вида [13]:

$$Sh = 2 + A \cdot \text{Re}^m \cdot \text{Sc}^n \quad (9)$$

Здесь: $Sh = \frac{\beta \cdot d}{D}$ – критерий Шервуда; d – диаметр капли, м; D – коэффициент молекулярной диффузии хладагента, $\text{м}^2/\text{с}$.

Аналогом критерия Шервуда в отечественной литературе является диффузионный критерий Прандтля Pr' . В условиях витания постулируется, что капли в паровом потоке движутся со скоростью пара, т.е. относительная скорость капли равна нулю. Из уравнения (9) следует:

$$Sh = 2 \rightarrow \beta = \frac{D}{r_{\max}} \quad (10)$$

Попадание капель жидкости в компрессор способно приводить к его выходу из строя. Важным является определение предельного размера капель – $r_{\max}$, которые при движении от дросселя до входа в компрессор должны перейти в паровую фазу.

Теоретически это возможно при значении времени движения капель равном бесконечности [14 - 16]. На практике же должно выполняться условие:

$$\tau_{\text{исп}} \leq \tau_{\text{нр}} \quad (11)$$

$\tau_{\text{нр}}$ – время пребывания потока пара в испарительном контуре, определяемое по выражению

$$\tau_{\text{нр}} = \frac{L}{W} \quad (12)$$

где: L – длина теплообменной трубки линии испарения, м.

Интегрирование уравнения (8) в пределах $[r_{\max}, r_{\min}]$ и $[0, \tau_{\text{нр}}]$ приводит к следующему:

$$\int_{r_{\min}}^{r_{\max}} dr = -3 \int_0^{\tau_{\text{исп}}} \beta / \rho_{\text{жс}} \cdot (P_n - P_{\text{ср}}) \cdot d\tau \quad (13)$$

Отсюда следует:

$$\tau_{\text{исп}} = \frac{(r_{\max} - r_{\min})^* \rho_{\text{жс}}}{3\beta \cdot (P_n - P_{\text{ср}})} \quad (14)$$

Обсуждение результатов. На основании предложенного математического описания был выполнен численный эксперимент по определению размеров капель, которые могут вылетать из кипящей жидкости фреона при работе теплового насоса. Для расчётов были использованы следующие данные: фреон R410A при давлении $P=5$ бар, температуре $T=-10^{\circ}\text{C}$, плотности жидкости фреона $\rho_{ж}=1210\text{кг}/\text{м}^3$, плотности пара $\rho_n=20,8\text{кг}/\text{м}^3$, динамической вязкости пара $\mu_n=11,56\cdot 10^{-6}\text{Па}\cdot\text{с}$, диаметре капель $d=1\text{мм}$ [17-20]. Изначально определяется кинематическая вязкость:

$$v_n = \frac{\mu_n}{\rho_n} = \frac{11,56\cdot 10^{-6}}{20,8} = 0,56\cdot 10^{-6}\text{м}^2/\text{с} \quad (15)$$

При этом критерий Архимеда для капель диаметром $d=1\text{мм}$ будет равен $\sqrt{Ar} = \sqrt{1,8\cdot 10^6} = 1,34\cdot 10^3$. Критерий Рейнольдса для витания определяется по формуле:

$$\text{Re}_{\text{ВИТ}} = \frac{Ar}{18 + 0,61\cdot\sqrt{Ar}} = \frac{1,8\cdot 10^6}{18 + 0,61\cdot 1,34\cdot 10^3} = 2154 \quad (16)$$

Тогда средняя расходная скорость пара в линии испарения составит:

$$\text{Re}_{\text{ВИТ}} = \frac{\omega_{\text{ВИТ}}\cdot d}{v_n} \Rightarrow \omega_{\text{ВИТ}} = \frac{\text{Re}_{\text{ВИТ}}\cdot v_n}{d} = \frac{2154\cdot 0,56\cdot 10^{-6}}{1\cdot 10^{-3}} = 1,2\text{ м/с} \quad (17)$$

Аналогичным образом проводятся расчеты средней расходной скорости пара в линии испарения для капель следующих диаметров: 0,1 мм; 0,3 мм; 0,5 мм; 0,7 мм; 1 мм; 1,3 мм; 1,5 мм. После проводятся аналогичные расчеты при $t=0^{\circ}\text{C}$ и $t=+10^{\circ}\text{C}$. Результаты расчетов представлены в табл.1. На основании данных табл.1 видно, что скорость уноса капель хладагента зависит от скорости пара в контуре испарения.

Таблица 1. Зависимость скорости витания капель от их диаметра

Table 1. Dependence of droplet soaring rate on their diameter

Скорость витания Soaring speed	Диаметр капель, мм Drop diameter						
	0,1	0,3	0,5	0,7	1	1,3	1,5
$T=-10^{\circ}\text{C}$	0,34	0,59	0,82	0,99	1,21	1,37	1,49
$T=0^{\circ}\text{C}$	0,34	0,71	0,96	1,16	1,41	1,61	1,74
$T=+10^{\circ}\text{C}$	0,34	0,82	1,12	1,34	1,63	1,86	2,01

Далее для расчета по формулам (12)-(14) применялись следующие характеристики теплового насоса: объём камеры сжатия – $V_{сж}=22,5\cdot 10^{-6}(\text{м})^3$; число оборотов двигателя – $n=1500\sim 2480$ (об/мин); диаметр трубопровода линии испарения – $d=16\cdot 10^{-3}$ (м). При этом для трубопровода линии испарения длиной $L=1,8\text{м}$ время движения составляет $\tau_{np}=0,5\sim 1,0$ секунд.

Вывод. Проведённые расчёты с использованием формулы (14) показали, что капли размером в диаметре менее 1 мм успевают испариться в паровом потоке за время движения от зоны кипения (дресселя) до каплеуловителя, расположенного перед компрессором. Дальнейшие теоретические исследования и постановочные эксперименты позволят выработать теоретические и практические рекомендации по конструктивному оформлению узла каплеулавливания, а также разработать математические модели тепломассообменных процессов для оптимизации режимов работы воздушных тепловых насосов.

Библиографический список:

1. Махова, А.В. Анализ и перспективы использования альтернативных источников энергии в России в 2014-2024 гг. / А.В. Махова, А.В. Нелипа // Евразийский союз ученых. - 2018. - №3(48). - С. 41-44.
2. Fedosov, S.V. Heat transfer intensification during condensation of refrigerant with straight pipelines for a heat pump heating system / S.V. Fedosov, V.N. Fedoseev, S.A. Loginova // E3S Web of Conferences. - 2021. - No. 258. - P. 09050.
3. Лойцянский, Л.Г. Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1987. - 840 с.
4. Abiev, R.S. Hydrodynamics and Heat Transfer of Circulating Two-Phase Taylor Flow in Microchannel Heat Pipe: Experimental Study and Mathematical Model // Industrial and Engineering Chemistry Research. - 2020. - No 9. - P. 3687-3701.
5. Ляшков, В.И. Теоретические основы теплотехники. - М. «Высшая школа», 2008. - 319 с.
6. Шешунова, Е.В. Оптимизация расчета процесса нагрева и охлаждения теплоносителей тепловым насосом / Е.В. Шешунова, И.В. Кряклина // Аграрная наука. - 2012 - № 1 - С. 29-30.
7. Чемяков, В.В. Построение математической модели системы автономного теплоснабжения на базе теплового насоса // Глобальная энергия. - 2012 - №2(147) - С. 15-22.
8. Шешунова, Е.В. Многокритериальное математическое моделирование работы теплового насоса / Е.В. Шешунова, К.А.

- Зиновьев // Вестник АПК Верхневолжья. - 2018. - № 4 (44). - С. 52-58.
9. Морозов Л.Н., Е.С. Тимошин, Е.В. Грибина. Применение теплонасосной компрессионной установки для утилизации низкопотенциального тепла конвертированного газа. Современные наукоемкие технологии. 2019. №1 (57). С. 102-107.
 10. Янговский, Е.И., Пустовалов Ю.В. Парокомпрессионные теплонасосные установки. М.: Энергоиздат, 1982. - 144 с.
 11. Kim, D.H. The effect of the refrigerant charge amount on single and cascade heat pump systems / D.H. Kim, H.S. Park, M.S. Kim M.S. // International Journal of Refrigeration. -2014. - Vol. 40. - P. 254-268.
 12. Ким, О. В., Стасенко А. Л. Кинетика капель в турбулентном потоке: характерные времена и прямое моделирование / О. В. Ким, А. Л. Стасенко // Матем. моделирование. - 2005. - С. 103-117.
 13. Кондратьев, Г. М. и др. Прикладная физика: Теплообмен в приборостроении. СПб: СПбГУ ИТМО. 2003. - 560 с.
 14. Емельянов, А.Л. Кинетика испарения капель в системах охлаждения теплонегруженных элементов приборов / А.Л. Емельянов, Е.С. Платунов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. - 2011. - №1(54). - С.84-88.
 15. Васильев Г.П. Теплохладоснабжение зданий и сооружений с использованием тепловой энергии поверхностных слоев земли. М.: Издат. дом «Граница», 2006. - 176 с.
 16. Абсорбционные преобразователи теплоты. А.В. Бараненко, Л.С. Тимофеевский, А.Г. Долотов, А.В. Попов. СПбГУ, 2005. - 338 с.
 17. Федосов, С.В. Тепловые процессы в испарительно-конденсационном контуре системы воздушного теплового насоса / С.В. Федосов, В.Н. Федосев, С.А. Логинова // Приволжский научный журнал. - 2022. - № 1 (61). - С. 104-111.
 18. Огуречников, Л.А. Математическое моделирование процесса внутритрубного кипения неазеотропных смесей в испарителе парокомпрессионного теплового насоса // Альтернативная энергетика и экология. - 2010. - № 2 (82). - С. 31-34.
 19. Вольтцев, А.В. Опытная теплонасосная установка // Научные труды Дальрыбвтуза. - 2015. - Т. 36. - С. 80-85.
 20. Огуречников Л. Конденсация R32/R134A в технологии теплонасосного теплоснабжения. Холод-ая техн. 2011. № 2. С. 46-48.

References:

1. Makhova, A.V. Analysis and prospects for the use of alternative energy sources in Russia in 2014-2024 / A.V. Makhova, A.V. Nelipa. *Eurasian Union of Scientists*. 2018; 3 (48): 41-44. [In Russ]
2. Fedosov, S.V. Heat transfer intensification during condensation of refrigerant with straight pipelines for a heat pump heating system / S.V. Fedosov, V.N. Fedoseev, S.A. Loginova. *E3S Web of Conferences*. 2021; 258: 09050.
3. Loitsyansky, L.G. Mechanics of liquid and gas. M.: Nauka, 1987; 840. [In Russ]
4. Abiev, R.S. Hydrodynamics and Heat Transfer of Circulating Two-Phase Taylor Flow in Microchannel Heat Pipe: Experimental Study and Mathematical Model. *Industrial and Engineering Chemistry Research*. 2020; 9: 3687-3701. [In Russ]
5. Lyashkov, V.I. Theoretical foundations of heat engineering. M. "Higher School", 2008; 319. [In Russ]
6. Sheshunova E.V. Optimization of the calculation of the process of heating and cooling of heat carriers by a heat pump / E.V. Sheshunova, I.V. Kryaklin. *Agrarian science*. 2012; 1: 29-30. [In Russ]
7. Chemekov, V.V. Construction of a mathematical model of an autonomous heat supply system based on a heat pump. *Global Energy*. 2012; 2 (147):15-22. [In Russ]
8. Sheshunova, E.V. Multicriteria mathematical modeling of heat pump operation / E.V. Sheshunova, K.A. Zinoviev. *Bulletin of the Upper Volga Agroindustrial Complex*. 2018; 4 (44): 52-58. [In Russ]
9. Morozov, L.N. The use of a heat pump compression unit for the utilization of low-grade heat of converted gas. L.N. Morozov, E.S. Timoshin, E.V. Gribina. *Modern science-intensive technologies. Regional application*. 2019; 1 (57):102-107. [In Russ]
10. Yantovsky, E.I., Pustovalov Yu.V. Vapor compression heat pump installations. M.: *Energoizdat*, 1982; 144. [In Russ]
11. Kim, D.H. The effect of the refrigerant charge amount on single and cascade heat pump systems / D.H. Kim, H.S. Park, M.S. Kim M.S.. *International Journal of Refrigeration*. 2014; 40: 254-268.
12. Kim O., Stasenko A. Kinetics of drops in a turbulent flow: characteristic times and direct modeling *Matem. modeling*. 2005; 103-117.
13. Kondratiev, G. M. et al. Applied Physics: Heat transfer in instrumentation. St. Petersburg State University ITMO. 2003: 560
14. Emelyanov, A.L. Kinetics of evaporation of drops in cooling systems of heat-loaded elements of devices / A.L. Emelyanov, E.S. Platonov. *News of higher educational institutions. Instrumentation*. 2011; (54):84-88. [In Russ]
15. Vasiliev G.P. Heat and cold supply of buildings and structures using the thermal energy of the surface layers of the earth. M. : Publishing house. house "Border", 2006: 176. [In Russ]
16. Absorption heat converters. A.V. Baranenko, L.S. Timofeevsky, A.G. Dolotov, A.V. Popov. *SPbGUNPT*, 2005: 338. [In Russ]
17. Fedosov, S.V. Thermal processes in the evaporation-condensation circuit of the air heat pump system / S.V. Fedosov, V.N. Fedoseev, S.A. Loginova. *Privolzhsky scientific journal*. 2022; 1 (61): 104-111. [In Russ]
18. Ogurechnikov, L.A. Mathematical modeling of the process of in-tube boiling of non-azeotropic mixtures in the evaporator of a vapor-compression heat pump. *International scientific journal Alternative Energy and Ecology*. 2010; 2 (82): 31-34. [In Russ]
19. Volyntsev, A.V. Experimental heat pump installation. *Scientific works of Dalrybvtuza*. 2015; 36: 80-85. [In Russ]
20. Ogurechnikov, L.A. R32/R134A condensation in heat pump heat supply technology. *Kholodilnaya tekhnika*. 2011; 2: 46-48. [In Russ]

Сведения об авторах:

Федосев Вадим Николаевич, доктор технических наук, профессор; sl79066171227@yandex.ru
Светлана Андреевна Логинова, кандидат технических наук, доцент; sl79066171227@yandex.ru

Information about authors:

Vadim N. Fedoseev, Dr. Sci. (Eng.), Prof.; sl79066171227@yandex.ru
Svetlana A. Loginova, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Department of Building Structures; sl79066171227@yandex.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 04.10.2022

Одобрена после рецензирования/ Revised 27.10.2022.

Принята в печать/Accepted for publication 27.10.2022.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 624.04

DOI: 10.21822/2073-6185-2022-49-4-182-193

Оригинальная статья / Original Paper

Определение несущей способности внецентренно сжатых трубобетонных колонн на основе деформационной теории пластичности бетона

К.Н. Хашхожев¹, Л.И. Лесняк¹, Р.М. Курачев², А.С. Чепурненко^{1,3}

¹Донской государственный технический университет,

¹344000, г. Ростов-на-Дону, площадь Гагарина 1, Россия,

²Дагестанский государственный технический университет,

²367026, г. Махачкала, пр. И. Шамиля, 70, Россия

³Казанский (Приволжский) федеральный университет,

³420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 18, Россия

Резюме. Цель. В статье предлагается метод конечно-элементного анализа трубобетонных колонн в физически нелинейной постановке путем сведения трехмерной задачи к двумерной на основе гипотезы плоских сечений. **Метод.** В качестве соотношений, устанавливающих связь между напряжениями и деформациями, используются уравнения теории пластичности бетона Г.А. Гениева. Методика апробирована путем сравнения решения с расчетом в трехмерной постановке в программном комплексе ЛИРА-САПР, а также с экспериментальными данными А.И. Сагадатов и расчетом по действующим отечественным нормам проектирования сталежелезобетонных конструкций. **Результат.** Установлено, что эффективной областью работы колонн круглого поперечного сечения являются малые эксцентриситеты продольной силы. **Вывод.** Предложенный подход может быть применен к анализу напряженно-деформированного состояния и несущей способности трубобетонных колонн произвольного сечения. Ограничений по составу бетона нет, а материалом оболочки может быть не только сталь, но и стеклопластик.

Ключевые слова: трубобетонные колонны, метод конечных элементов, дилатация, теория пластичности, физическая нелинейность

Для цитирования: К.Н. Хашхожев, Л.И. Лесняк, Р.М. Курачев, А.С. Чепурненко. Определение несущей способности внецентренно сжатых трубобетонных колонн на основе деформационной теории пластичности бетона. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022;49(4):182-193. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-4-182-193

Determination of the bearing capacity of eccentrically compressed concrete filled steel tubular columns on the basis of the deformation theory of concrete plasticity

K.N. Khashkhoev¹, L.I. Lesnyak¹, R.M. Kurachev², A.S. Chepurnenko^{1,3}

¹Don State Technical University,

¹1 Gagarin Square, Rostov-on-Don 344000, Russia,

²Daghestan State Technical University,

²70 I. Shamilya Ave., Makhachkala 367026, Russia

³Kazan (Volga Region) Federal University,

³18 Kremlevskaya Str., Kazan 420008, Russia

Abstract. Objective. The article proposes a method for finite element analysis of pipe-concrete columns in a physically nonlinear setting by reducing a three-dimensional problem to a two-dimensional one based on the hypothesis of plane sections. **Method.** The equations of the theory of plasticity of concrete by G.A. Geniev are used. The technique was tested by comparing the solution with a calculation in a three-dimensional setting in the LIRA-SAPR software package, as well as with the experimental data of A.I. Sagadatov and calculation according to the current Russian design codes for steel-pipe concrete structures. **Result.** It has been established that the effective area of operation of

columns with a circular cross section is small eccentricities of the longitudinal force. **Conclusion.** The proposed approach can be applied to the analysis of the stress-strain state and the bearing capacity of pipe-concrete columns of arbitrary section. There are no restrictions on the composition of concrete, and the shell material can be not only steel, but also fiberglass.

Keywords: concrete filled steel tubular columns, finite element method, dilatation, theory of plasticity, physical nonlinearity

For citation: K.N. Khashkhodzhev, L.I. Lesnyak, R.M. Kurachev, A.S. Chepurnenko. Determination of the bearing capacity of eccentrically compressed concrete filled steel tubular columns on the basis of the deformation theory of concrete plasticity. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science. 2022; 49 (4):182-193. DOI: 10.21822 /2073-6185-2022-49-4-182-193

Введение. Трубобетонные колонны (ТБК) в настоящее время все шире применяются в строительстве, особенно при возведении высотных зданий [1-4] благодаря ряду важных преимуществ, среди которых высокая несущая способность и скорость возведения, меньшая материалоемкость, потребительские и производственные затраты. Одним из существенных недостатков ТБК является отсутствие общепринятых методик расчета, учитывающих влияние бокового обжатия бетона. Не существует универсального метода, пригодного для произвольной формы поперечного сечения, которое, помимо круглого, может быть прямоугольным [5-8], шестигранным [9-11], восьмиугольным [12], кольцевым [13-14]. Кроме стали, в качестве материала оболочки может использоваться стеклопластик [15]. Большинство публикаций по методам расчета трубобетона, в том числе и перечисленные выше, основаны на эмпирическом подходе, не в полной мере отражающем специфику изменения напряженно-деформированного состояния колонн при различных нагрузках. Это накладывает ограничения на форму поперечного сечения, материал оболочки и состав бетона (тяжелый и легкий бетон, высокопрочный бетон и обычный бетон и т. д.).

Постановка задачи. Наиболее близкие к реальной работе конструкций результаты дает конечно-элементное моделирование в объемной постановке с учетом физической нелинейности материала [16]. Однако такой подход требует больших вычислительных затрат. Нами предлагается подход, позволяющий уменьшить размерность задачи определения напряженно-деформированного состояния с трехмерной на двумерную без заметной потери точности результатов.

Методы исследования. Расчетная схема конструкции представлена на рис. 1. Трехмерная задача сводится к двумерной, путем введения гипотезы плоских сечений.

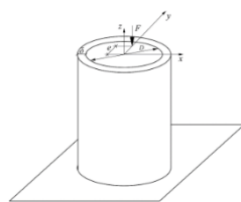


Рис.1. Расчетная схема
 Fig.1. Calculation scheme

Для бетона будут использоваться плоские треугольные конечные элементы (КЭ) (рис. 2), а для стальной оболочки - одномерные двухузловые конечные элементы (рис. 3).

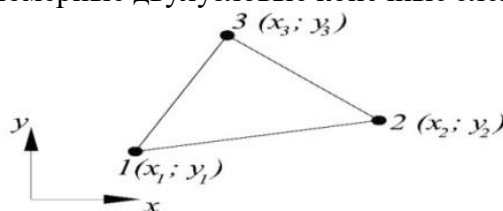


Рис. 2. Плоский треугольный КЭ для моделирования бетона
 Fig. 2. Flat triangular FE for concrete modeling

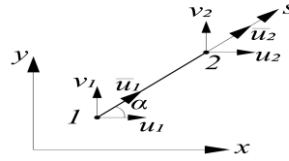


Рис.3. Одномерный двухузловой КЭ для моделирования стальной обоймы

Fig.3. One-dimensional two-node FE for modeling a steel cage

Плоские треугольные конечные элементы имеют в каждом узле 2 степени свободы - перемещения u_i и v_i . Аппроксимация перемещений выполняется линейными функциями:

$$\begin{aligned} u &= N_1 u_1 + N_2 u_2 + N_3 u_3; \\ v &= N_1 v_1 + N_2 v_2 + N_3 v_3, \end{aligned} \quad (1)$$

где $N_i = \frac{1}{2A}(a_i + b_i x + c_i y)$, A – площадь поперечного сечения элемента, $a_1 = x_2 y_3 - x_3 y_2$, $b_1 = y_2 - y_3$, $c_1 = x_3 - x_2$.

Коэффициенты $a_2, b_2, c_2, a_3, b_3, c_3$ определяются путем циклической замены индексов $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 1$. Вектор деформаций в плоскости xy записывается в виде:

$$\{\varepsilon\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \end{Bmatrix} = [B]\{U\}, \quad (2)$$

$$\text{где } [B] = \frac{1}{2A} \begin{bmatrix} b_1 & 0 & b_2 & 0 & b_3 & 0 \\ 0 & c_1 & 0 & c_2 & 0 & c_3 \\ c_1 & b_1 & c_2 & b_2 & c_3 & b_3 \end{bmatrix}, \{U\} = \{u_1 \quad v_1 \quad u_2 \quad v_2 \quad u_3 \quad v_3\}^T - \text{вектор узловых перемещений.}$$

Деформация ε_z представляет собой сумму осевой деформации и деформации, вызванной изменением кривизны:

$$\varepsilon_z = \varepsilon_z^0 + y\chi. \quad (3)$$

При выводе разрешающих уравнений будем учитывать наличие вынужденных деформаций $\varepsilon_x^*, \varepsilon_y^*, \varepsilon_z^*, \gamma_{xy}^*$, к которым могут быть отнесены деформации ползучести, усадки, температурные деформации, эффекты дилатации и др. Связь между напряжениями и деформациями бетона с учетом вынужденных деформаций, записывается в виде:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{1}{E}(\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)) + \varepsilon_x^*; \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E}(\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)) + \varepsilon_y^*; \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E}(\sigma_z - \nu(\sigma_y + \sigma_x)) + \varepsilon_z^*; \\ \gamma_{xy} &= \frac{2(1+\nu)}{E}\tau_{xy} + \gamma_{xy}^*. \end{aligned} \quad (4)$$

Исключим из (4) напряжение σ_z :

$$\sigma_z = E(\varepsilon_z - \varepsilon_z^*) + \nu(\sigma_y + \sigma_x) = E(\varepsilon_z^0 + y\chi - \varepsilon_z^*) + \nu(\sigma_y + \sigma_x). \quad (5)$$

Подставляя (5) в первые два уравнения (4), получим:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{1}{E_1}(\sigma_x - \nu_1 \sigma_y) + \varepsilon_x^* - \nu(\varepsilon_z^0 + y\chi - \varepsilon_z^*); \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E_1}(\sigma_y - \nu_1 \sigma_x) + \varepsilon_y^* - \nu(\varepsilon_z^0 + y\chi - \varepsilon_z^*), \end{aligned} \quad (6)$$

где $E_1 = E / (1 - \nu^2)$, $\nu_1 = \nu / (1 - \nu)$.

Последнее уравнение в (4) можно записать в виде:

$$\gamma_{xy} = \frac{2(1+\nu_1)}{E_1} \tau_{xy} + \gamma_{xy}^*. \quad (7)$$

Выразим в (6)-(7) напряжения через деформации:

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \frac{E_1}{1-\nu_1^2} \left(\varepsilon_x + \nu_1 \varepsilon_y - (\varepsilon_x^* + \nu_1 \varepsilon_y^*) + \nu(1+\nu_1)(\varepsilon_z^0 + y\chi - \varepsilon_z^*) \right) = \\ &= \frac{E_1}{1-\nu_1^2} \left(\varepsilon_x + \nu_1 \varepsilon_y - (\varepsilon_x^* + \nu_1 \varepsilon_y^*) + \nu_1 (\varepsilon_z^0 + y\chi - \varepsilon_z^*) \right); \\ \sigma_y &= \frac{E_1}{1-\nu_1^2} \left(\varepsilon_y + \nu_1 \varepsilon_x - (\varepsilon_y^* + \nu_1 \varepsilon_x^*) + \nu_1 (\varepsilon_z^0 + y\chi - \varepsilon_z^*) \right); \\ \tau_{xy} &= \frac{E_1}{2(1+\nu_1)} (\gamma_{xy} - \gamma_{xy}^*). \end{aligned} \quad (8)$$

Запишем равенства (8) в матричном виде: $\{\sigma\} = [D](\{\varepsilon\} - \{\varepsilon^*\}) + \{\sigma_1\}$, (9)

$$\text{где } [D] = \frac{E_1}{1-\nu_1^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu_1 & 0 \\ \nu_1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu_1}{2} \end{bmatrix}, \{\sigma\} = \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix}, \{\varepsilon\} = \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix}, \{\sigma_1\} = \frac{E_1 \nu_1}{1-\nu_1^2} (\varepsilon_z^0 + y\chi - \varepsilon_z^*) \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Представим равенство (5) в виде:

$$\sigma_z = E(\varepsilon_z^0 + y\chi - \varepsilon_z^*) + \nu(\sigma_y + \sigma_x) = E(\varepsilon_z^0 + y\chi - \varepsilon_z^*) + \nu\{\sigma\}^T \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

При выводе разрешающих уравнений будем использовать принцип минимума полной энергии. Потенциальная энергия деформации трубобетонного элемента представляет собой сумму потенциальной энергии бетона Π_b и стали Π_s . Величина Π_b определяется по формуле:

$$\Pi_b = \frac{1}{2} \int_A (\sigma_x \varepsilon_x^{el} + \sigma_y \varepsilon_y^{el} + \tau_{xy} \gamma_{xy}^{el} + \sigma_z \varepsilon_z^{el}) dA. \quad (11)$$

Нижние индексы «el» в формуле (11) соответствуют упругим деформациям, которые представляют собой разницу между полной и вынужденной деформациями. Представим выражение (11) в виде:

$$\Pi_b = \frac{1}{2} \int_A \sigma_z (\varepsilon_z^0 + y\chi - \varepsilon_z^*) dA + \frac{1}{2} \int_A \{\sigma\}^T (\{\varepsilon\} - \{\varepsilon^*\}) dA. \quad (12)$$

Рассмотрим далее отдельно первый интеграл в (12):

$$\frac{1}{2} \int_A \sigma_z (\varepsilon_z^0 + y\chi - \varepsilon_z^*) dA = \frac{1}{2} \int_A E (\varepsilon_z^0 + y\chi - \varepsilon_z^*)^2 dA + \frac{\nu}{2} \int_A \{\sigma\}^T \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} (\varepsilon_z^0 + y\chi - \varepsilon_z^*) dA. \quad (13)$$

Первый член в (13) обращается в нуль после минимизации по вектору узловых перемещений $\{U\}$. Представим второе слагаемое в виде:

$$\begin{aligned} \frac{\nu}{2} \int_A \{\sigma\}^T \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} (\varepsilon_z^0 + y\chi - \varepsilon_z^*) dA &= \frac{\nu}{2} \int_A (\{\sigma_1\}^T + (\{\varepsilon\}^T - \{\varepsilon^*\}^T) [D]) \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} (\varepsilon_z^0 + y\chi - \varepsilon_z^*) dA = \\ &= \frac{\nu}{2} \left(\int_A (\{\sigma_1\}^T - \{\varepsilon^*\}^T [D]) \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} (\varepsilon_z^0 + y\chi - \varepsilon_z^*) dA + \int_A \{U\}^T [B]^T [D] \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} (\varepsilon_z^0 + y\chi - \varepsilon_z^*) dA \right). \end{aligned} \quad (14)$$

Первый интеграл в (14) также обращается в нуль после минимизации. Во втором интеграле будем считать, что деформация ε_z^* внутри конечного элемента постоянна. С учетом этого она представлена в виде:

$$\begin{aligned} \frac{\nu}{2} \int_A \{U\}^T [B]^T [D] \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{Bmatrix} (\varepsilon_z^0 + y \chi - \varepsilon_z^*) dA &= \frac{\nu}{2} \{U\}^T [B]^T [D] \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{Bmatrix} \left((\varepsilon_z^0 - \varepsilon_z^*) A + \chi \int_A y dA \right) = \\ &= \frac{1}{2} \{U\}^T [B]^T A \nu [D] \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{Bmatrix} (\varepsilon_z^0 + y_c \chi - \varepsilon_z^*) = \frac{1}{2} \{U\}^T [B]^T A \frac{E_1 \nu_1}{1 - \nu_1^2} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{Bmatrix} (\varepsilon_z^0 + y_c \chi - \varepsilon_z^*) = \\ &= \frac{1}{2} \{U\}^T [B]^T A \{\sigma_1\}. \end{aligned} \quad (15)$$

В формуле (15) $y_c = (y_1 + y_2 + y_3) / 3$ – координата центра тяжести конечного элемента. Рассмотрим далее второй член в (12):

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \int_A \{\sigma\}^T \{\varepsilon^{el}\} dA &= \frac{1}{2} \int_A \left[(\{\varepsilon\}^T - \{\varepsilon^*\}^T) [D] + \{\sigma_1\}^T \right] (\{\varepsilon\} - \{\varepsilon^*\}) dA = \\ &= \frac{1}{2} \int_A \{\varepsilon\}^T [D] \{\varepsilon\} - 2 \{\varepsilon\}^T [D] \{\varepsilon^*\} + \{\varepsilon^*\}^T [D] \{\varepsilon^*\} + \{\sigma_1\}^T \{\varepsilon\} - \{\sigma_1\}^T \{\varepsilon^*\} dA. \end{aligned} \quad (16)$$

Слагаемые $\{\varepsilon^*\}^T [D] \{\varepsilon^*\}$ и $\{\sigma_1\}^T \{\varepsilon^*\}$ после минимизации по вектору узловых перемещений исчезают. Рассмотрим отдельно каждое из оставшихся слагаемых:

$$\frac{1}{2} \int_A \{\varepsilon\}^T [D] \{\varepsilon\} dA = \frac{1}{2} \{U\}^T [B]^T [D] [B] A \{U\} = \frac{1}{2} \{U\}^T [K_b] \{U\}, \quad (17)$$

где $[K_b] = [B]^T [D] [B] A$ – матрица жёсткости бетона.

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \int_A \{\sigma_1\}^T \{\varepsilon\} dA &= \frac{1}{2} \int_A \{\varepsilon\}^T \{\sigma_1\} dA = \frac{1}{2} \{U\}^T [B]^T \{\sigma_1\} A; \\ \int_A \{\varepsilon\}^T [D] \{\varepsilon^*\} dA &= \{U\}^T [B]^T [D] \{\varepsilon^*\} A = \{U\}^T \{F^*\}. \end{aligned} \quad (18)$$

Для КЭ стальной оболочки перемещения аппроксимируются следующим образом:

$$u(s) = u_1 + \frac{u_2 - u_1}{l} s. \quad (19)$$

Окружные деформации оболочки определяются как:

$$\varepsilon_{s\theta} = \frac{du}{ds} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{l} & \frac{1}{l} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} = [B_s] \{U_s\}. \quad (20)$$

Напряжения в стали рассчитываются по формулам:

$$\begin{aligned} \sigma_{s\theta} &= \frac{E_s}{1 - \nu_s^2} (\varepsilon_{s\theta} + \nu_s \varepsilon_{sz}) = \frac{E_s}{1 - \nu_s^2} (\varepsilon_{s\theta} + \nu_s (\varepsilon_z^0 + y_s \chi)); \\ \sigma_{sz} &= \frac{E_s}{1 - \nu_s^2} (\varepsilon_{sz} + \nu_s \varepsilon_{s\theta}) = \frac{E_s}{1 - \nu_s^2} (\varepsilon_z^0 + y_s \chi + \nu_s \varepsilon_{s\theta}). \end{aligned} \quad (21)$$

Координата y_s внутри КЭ непостоянна. Для удобства вычислим его посередине элемента. Потенциальная энергия деформации КЭ записывается в виде:

$$\Pi_s = \frac{1}{2} \left(\delta \int_0^l \sigma_{s\theta} \varepsilon_{s\theta} ds + \delta \int_0^l \sigma_{sz} \varepsilon_{sz} ds \right). \quad (22)$$

Первый интеграл в (22) определяется как

$$\begin{aligned} \delta \int_0^l \sigma_{s\theta} \varepsilon_{s\theta} ds &= \frac{E_s \delta}{1-\nu_s^2} \int_0^l \left(\{U_s\}^T [B_s]^T + \nu_s (\varepsilon_z^0 + y_s \chi) \right) [B_s] \{U_s\} ds = \\ &= \frac{E_s \delta l}{1-\nu_s^2} \{U_s\}^T [B_s]^T [B_s] \{U_s\} + \frac{E_s \nu_s \delta l}{1-\nu_s^2} (\varepsilon_z^0 + y_s \chi) [B_s] \{U_s\} = \\ &= \{U_s\}^T [K_s] \{U_s\} + \{U_s\}^T [B_s]^T \frac{E_s \nu_s \delta l}{1-\nu_s^2} (\varepsilon_z^0 + y_s \chi), \end{aligned} \quad (23)$$

где $[K_s] = \frac{E_s \delta l}{1-\nu_s^2} [B_s]^T [B_s] = \frac{E_s \delta}{l(1-\nu_s^2)} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}$ - матрица жесткости стальной облоймы.

Второй интеграл в (22) вычисляется следующим образом:

$$\begin{aligned} \delta \int_0^l \sigma_{sz} \varepsilon_{sz} ds &= \frac{E_s \delta}{1-\nu_s^2} \int_0^l (\varepsilon_z^0 + y_s \chi + \nu_s \{U_s\}^T [B_s]^T) (\varepsilon_z^0 + y_s \chi) ds = \\ &= \frac{E_s \delta}{1-\nu_s^2} \left(\int_0^l (\varepsilon_z^0 + y_s \chi)^2 ds + \nu_s \int_0^l (\varepsilon_z^0 + y_s \chi) [B_s] \{U_s\} ds \right). \end{aligned} \quad (24)$$

Первый интеграл в (24) обращается в нуль после минимизации по вектору узловых перемещений. Второй интеграл записывается как:

$$\frac{E_s \delta \nu_s}{1-\nu_s^2} \int_0^l (\varepsilon_z^0 + y_s \chi) [B_s] \{U_s\} ds = \{U_s\}^T [B_s]^T \frac{E_s \delta \nu_s l}{1-\nu_s^2} (\varepsilon_z^0 + y_s \chi). \quad (25)$$

Внешние силы при перемещениях колонны в плоскости ху работу не совершают, поэтому функционал полной энергии для рассматриваемой задачи равен потенциальной энергии деформации. Минимизируя потенциальную энергию деформации по вектору узловых перемещений, получаем систему линейных алгебраических уравнений:

$$[K] \{U\} + \{F_b\} + \{F_s\} - \{F^*\} = 0, \quad (26)$$

$$\begin{aligned} \text{где } [K] &= [K_b] + [K_s], \{F_b\} = [B]^T \{\sigma_1\} A = [B]^T A \frac{E_1 \nu_1}{1-\nu_1^2} (\varepsilon_z^0 + y_c \chi - \varepsilon_z^*), \\ \{F_s\} &= [B_s]^T \frac{E_s \delta \nu_s l}{1-\nu_s^2} (\varepsilon_z^0 + y_s \chi). \end{aligned}$$

Вектор $\{F_s\}$ в (27), а также матрица $[K_s]$ в (23) записаны в локальной системе координат элемента. При составлении системы уравнений МКЭ выполняется преобразование координат по формулам:

$$\{\bar{U}\} = [L] \{U\}; [K] = [L]^T [\bar{K}] [L]; \{F\} = [L]^T \{\bar{F}\}; [L] = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \end{bmatrix}. \quad (27)$$

где $\{\bar{U}\}, \{\bar{F}\}, [\bar{K}]$ – вектор узловых перемещений, вектор нагрузки и матрица жесткости в локальной системе координат, $\{U\}, \{F\}, [K]$ – то же самое для глобальной системы координат. Система (26), помимо вектора узловых перемещений, содержит еще 2 неизвестных: величины ε_z^0 и χ . В качестве двух дополнительных уравнений выступают условия равновесия:

$$\begin{aligned} F &= -\sum \sigma_{z,i} A_i - \delta \sum \sigma_{sz,i} l_i; \\ M &= Fe = -\sum \sigma_{z,i} y_{c,i} A_i - \delta \sum \sigma_{sz,i} y_{s,i} l_i. \end{aligned} \quad (28)$$

Напряжение σ_z в i -м треугольном КЭ бетона определяется как:

$$\begin{aligned} \sigma_z &= E (\varepsilon_z^0 + y_c \chi - \varepsilon_z^*) + \nu (\sigma_x + \sigma_y) = E (\varepsilon_z^0 + y_c \chi - \varepsilon_z^*) + \nu \{1 \ 1 \ 0\} \{\sigma\} = \\ &= E (\varepsilon_z^0 + y_c \chi - \varepsilon_z^*) + \nu \{1 \ 1 \ 0\} \left([D] ([B] \{U\} - \{\varepsilon^*\}) + \{\sigma_1\} \right) = \\ &= \left(E + \frac{2E_1 \nu_1}{1-\nu_1^2} \right) (\varepsilon_z^0 + y_c \chi - \varepsilon_z^*) + \nu \{1 \ 1 \ 0\} [D] ([B] \{U\} - \{\varepsilon^*\}). \end{aligned} \quad (29)$$

Напряжение σ_{sz} в i -м одномерном КЭ стальной оболочки определяется как:

$$\sigma_{sz} = \frac{E_s}{1-\nu_s^2} (\varepsilon_z^0 + \nu_s \chi + \nu_s \varepsilon_{s\theta}) = \frac{E_s}{1-\nu_s^2} (\varepsilon_z^0 + \nu_s \chi + \nu_s [B_s][L]\{U\}). \quad (30)$$

Таким образом, для общего числа узлов n задача сводится к $2n + 2$ уравнениям с $2n + 2$ неизвестными. В качестве уравнений, устанавливающих связь между напряжениями и деформациями в бетоне, используются зависимости деформационной теории пластичности бетона Г.А. Гениева [17]:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{1}{E(\Gamma)} (\sigma_x - \nu (\sigma_y + \sigma_z)) + \varepsilon_\theta; \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E(\Gamma)} (\sigma_y - \nu (\sigma_x + \sigma_z)) + \varepsilon_\theta; \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E(\Gamma)} (\sigma_z - \nu (\sigma_x + \sigma_y)) + \varepsilon_\theta; \\ \gamma_{xy} &= \frac{2(1+\nu)}{E(\Gamma)} \tau_{xy}, \end{aligned} \quad (31)$$

где $\varepsilon_\theta = -g_0 \Gamma^2 / 3$ – дилатационные деформации, g_0 – модуль дилатации, $\Gamma = \sqrt{\frac{2}{3} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2}$ – интенсивность деформаций сдвига.

Дилатационные деформации можно рассматривать как частный случай вынужденных деформаций $\varepsilon_x^*, \varepsilon_y^*, \varepsilon_z^*$. Модуль дилатации g_0 в теории Гениева определяется как:

$$g_0 = -\frac{\theta_c}{\Gamma_c^2}, \quad (32)$$

где θ_c – предельная объемная деформация бетона при чистом сдвиге, Γ_c – предельная интенсивность сдвиговых деформаций при чистом сдвиге, рассчитываемая по формуле:

$$\Gamma_c = \frac{2T_c}{G_0}. \quad (33)$$

В формуле (33) T_c – предельная интенсивность касательных напряжений при чистом сдвиге. Нами она определялась как $T_c = \sqrt{R_b R_{bt}} / 3$ на основе критерия прочности П.П. Баландина [18], где R_b и R_{bt} – прочность бетона на сжатие и растяжение соответственно, G_0 – начальный модуль сдвига бетона, E_0 – начальный модуль упругости бетона.

Секущий модуль $E(\Gamma)$ нами определялся по формуле:

$$E(\Gamma) = E_0 \left(1 - \frac{\Gamma}{2\Gamma_s} \right), \quad (34)$$

где Γ_s – предельная интенсивность сдвиговых деформаций, зависящая от характера напряженного состояния.

При использовании критерия П.П. Баландина:

$$\Gamma_s = \Gamma_c k(\lambda), \quad k(\lambda) = \frac{\lambda}{2} + \sqrt{\frac{\lambda^2}{4} + 1}. \quad (35)$$

Параметр λ в (35) рассчитывается по формуле:

$$\lambda = \frac{f\sigma}{T}, \quad (36)$$

$$\text{где } f = \frac{3T_c(R_b - R_{bt})}{R_b R_{bt}}, \quad \sigma = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) / 3.$$

Расчет производится ступенчатым методом, нагрузка увеличивается малыми порциями ΔF . Приращение дилатационной деформации определяется как:

$$\Delta \varepsilon_o = \varepsilon_o(\Gamma + \Delta \Gamma) - \varepsilon_o(\Gamma) = -\frac{g_o}{3}(\Gamma^2 + 2\Gamma \Delta \Gamma + \Delta \Gamma^2) - \frac{g_o}{3}\Gamma^2 = -\frac{g_o}{3}(2\Gamma \Delta \Gamma + \Delta \Gamma^2). \quad (37)$$

Величиной $\Delta \Gamma^2$ по сравнению с первым слагаемым в скобках можно пренебречь, так как это величина более высокого порядка малости, и тогда формула (37) принимает вид:

$$\Delta \varepsilon_o = -\frac{2g_o\Gamma \Delta \Gamma}{3}. \quad (38)$$

Материал оболочки предполагается идеально упругопластическим; используется условие пластичности Губера-Мизеса-Генки:

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\sigma_{sz}^2 - \sigma_{sz}\sigma_{s\theta} + \sigma_{s\theta}^2} = R_y, \quad (39)$$

где R_y — предел текучести стали. Для расчетов авторами разработана программа в среде MATLAB.

Обсуждение результатов. Для контроля правильности полученных уравнений и разработанной методики первым шагом была решена тестовая задача в упругой постановке с последующим сравнением в программном комплексе ЛИРА-САПР. Решение проводилось при следующих исходных данных: $D = 0,3$ м, $\delta = 2$ мм, $E_b = 1,4 \cdot 10^4$ МПа, $E_s = 2 \cdot 10^5$ МПа, $F = 600$ кН, $e = D/2$, $\nu_s = 0,3$, $\nu_b = 0,2$. В силу симметрии рассматривалась половина поперечного сечения. В программном комплексе ЛИРА-САПР задача решалась в трехмерной постановке, бетон моделировался объемными призматическими КЭ, стальная оболочка моделировалась плоскими оболочечными КЭ. Для исключения локальных эффектов в месте приложения силы на верхнем конце колонны была установлена пластина с большой жесткостью. Расчетная схема представлена на рис. 4.

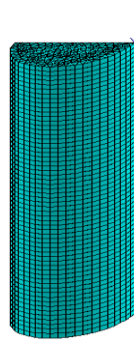


Рис.4. Расчетная схема в ПК ЛИРА-САПР
 Fig.4. Calculation scheme in SP LIRA-SAPR

Полученные мозаики напряжений σ_z , σ_x , σ_y представлены на рис. 5 – рис. 7.

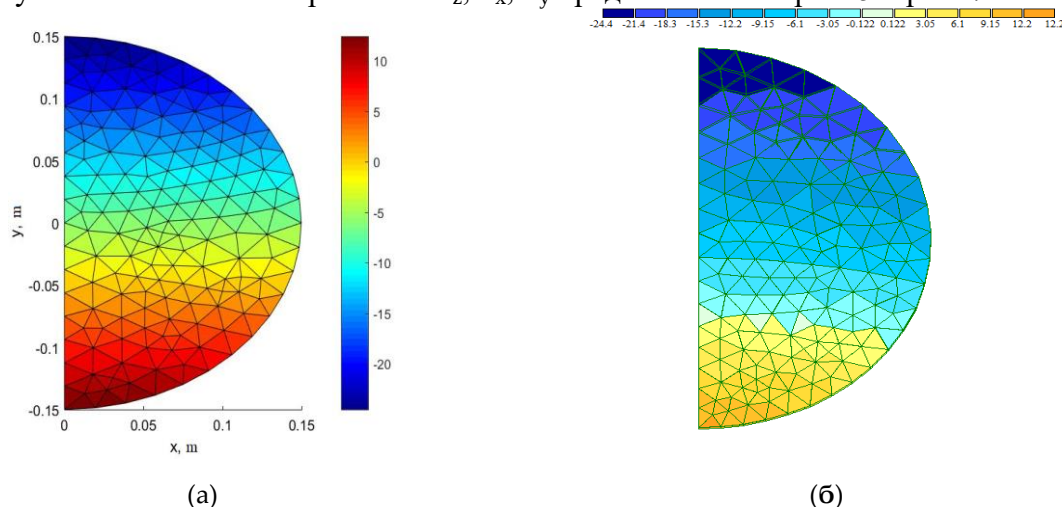


Рис.5. Мозаика напряжений σ_z (МПа): (а) – MATLAB; (б) ЛИРА-САПР
 Fig.5. Mosaic of stresses σ_z (MPa): (a) - MATLAB; (b) LIRA-SAPR

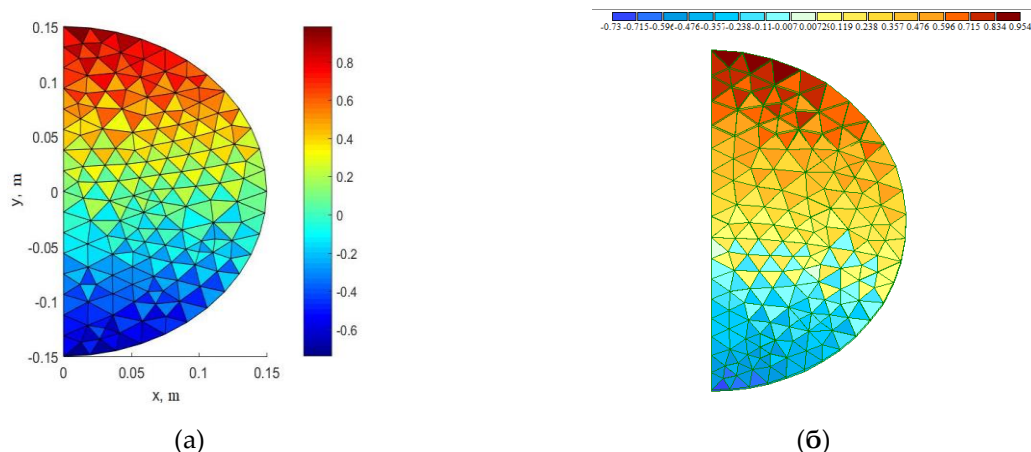


Рис.6. Мозаика напряжений σ_x (МПа): (а) – MATLAB; (б) ЛИРА-САПР
Fig.6. Mosaic of stresses σ_x (MPa): (a) - MATLAB; (b) LIRA-SAPR

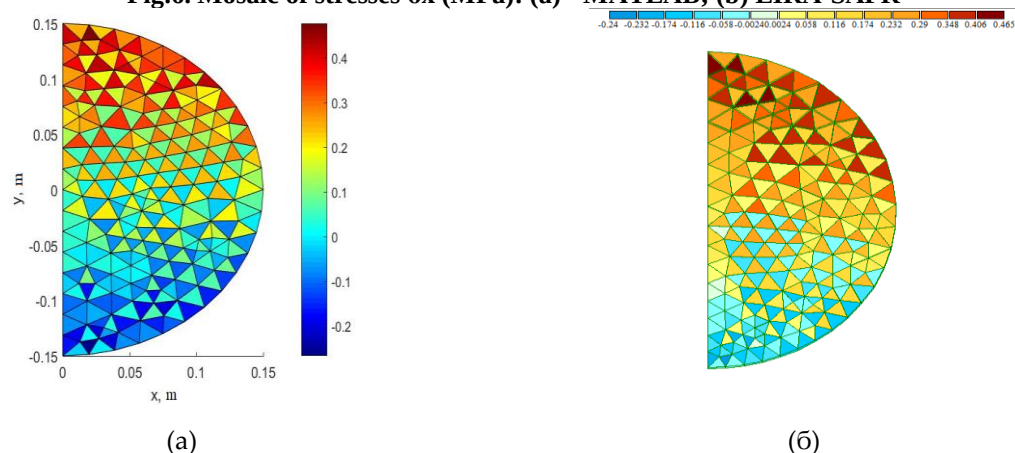


Рис.7. Мозаика напряжений σ_y (МПа): (а) – MATLAB; (б) ЛИРА-САПР
Fig. 7. Stress mosaic σ_y (MPa): (a) MATLAB; (b) LIRA-SAPR

Сравнение значений максимальных напряжений в ЛИРА-САПР и Matlab приведено в табл. 1.

Таблица 1. Сравнение максимальных напряжений в ЛИРА-САПР и MATLAB
Table 1. Comparison of maximum stresses in LIRA-SAPR and MATLAB

	σ_z , МПа	σ_x , МПа	σ_y , МПа
MATLAB	24,5	0,985	0,478
ЛИРА-САПР LIRA-SAPR	24,4	0,954	0,465

Разброс напряжений σ_y в соседних элементах наблюдается как при решении в трехмерной постановке в ЛИРА-САПР, так и при решении в двумерной постановке в MATLAB. Это связано с тем, что напряжения σ_y значительно ниже напряжений σ_z . Кроме того, причиной могут быть низкие аппроксимационные свойства треугольных симплекс элементов. При более мелкой сетке КЭ этот разброс уменьшается. Расчет на грубой сетке дает завышенные значения напряжений, что уходит в запас прочности.

Также разработанная методика и программное обеспечение были апробированы на экспериментальных данных, представленных в работах А.И. Сагадатов [19-20]. Здесь мы приведем сравнение с экспериментальными данными для двух серий колонн с внешним диаметром бетонного ядра 159 и 219 мм и толщиной стенки 6 и 8 мм соответственно. При расчете по авторской методике применялись два варианта моделирования трубобетонной колонны. В первом варианте бетон и обойма имели общие узлы, а во втором между узлами бетона и обоймы устанавливались контактные элементы, имеющие бесконечную жесткость при положительном контактом давлении и нулевую жесткость при отсутствии контакта. При этом заметной разницы в результатах при расчете по двум вариантам выявлено не было.

В табл. 2 представлены опытные величины предельных нагрузок $N_{u,эксп}$, полученные нами теоретические значения $N_{u,теор}$, величины предельных нагрузок $N_{u,bs}$, вычисленные без учета бокового обжатия ядра, а также значения предельных нагрузок $N_{u,норм}$, вычисленные в соответствии с СП 266.1325800.2016.

Таблица 2. Значения предельных нагрузок
Table 2. Values of ultimate loads

Номер образца	D , мм	δ , мм	R_b , МПа	e/D	$N_{u,эксп}$, кН	$N_{u,теор}$, кН	$N_{u,норм}$, кН	$N_{u,bs}$, кН	$N_{u,теор}/N_{u,bs}$
1	159	6	22,0	0,065	1412	1505	2052	1200	1,25
2	159	6	22,5	0,13	1213	1280	1338	1060	1,21
3	159	6	22,3	0,26	958	975	1062	920	1,06
4	219	8	32,5	0,065	2911	3129	4416	2780	1,13
5	219	8	30,5	0,13	2508	2600	2712	2365	1,1
6	219	8	32,1	0,26	1945	1990	2184	1870	1,06

Из табл. 2 видно, что совпадение результатов достаточно хорошее; наибольшее отклонение теоретических значений предельных нагрузок от экспериментальных составляет 7,5 %. Также из данной таблицы видно, что с увеличением эксцентриситета продольной силы эффект от работы бетона в трехосном напряженном состоянии снижается. Обращает на себя внимание, что при малых эксцентриситетах нормы проектирования дают сильно завышенные значения предельных нагрузок (до 40%). Объяснить это можно тем, что в нормы проектирования заложены прямоугольные эпюры напряжений для бетона и стали в предельном состоянии.

Вывод. Разработана методика расчета внецентренно сжатых коротких колонн с учетом бокового обжатия в физически нелинейной постановке с использованием метода конечных элементов. На основе гипотезы плоских сечений трехмерная задача сведена к двумерной. Для контроля правильности результатов в трехмерной постановке решена упругая задача в программном комплексе ЛИРА с последующим сравнением результатов. Также методика апробирована на экспериментальных данных для внецентренно сжатых колонн, представленных в работе А.И. Сагадатов. Подтверждено, что эффективной областью применения трубобетонных колонн являются случаи малых эксцентриситетов. Установлено, что при малых эксцентриситетах действующие нормы проектирования сталежелезобетонных конструкций дают сильно завышенные значения предельных нагрузок.

Библиографический список:

1. Резван, А.В. Рационализация технологических, конструктивных и архитектурных решений трубобетонных конструкций на примере колонн высотных зданий // Инженерный вестник Дона / А.В. Резван, М.А. Колотиенко. – 2020. – №5. – URL: ivdon.ru/magazine/archive/N5y2020/6475
2. Аадсан, А. Техничко-экономический расчет металлических, железобетонных и трубобетонных колонн с использованием вычислительных комплексов / А. Аадсан, Д.О. Тенемаза, А.Ю. Кубасов // Инженерный вестник Дона. – 2018. – №2. – URL: ivdon.ru/magazine/archive/N2y2018/5015
3. Дуванова, И. А. Трубобетонные колонны в строительстве высотных зданий и сооружений / И. А. Дуванова, И. Д. Сальманов // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2014. – №. 6. – С. 89-103.
4. Кришан, А. Л. Трубобетонные колонны для многоэтажных зданий / А.Л. Кришан // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2009. – №. 4. – С. 75-80.
5. Кришан, А. Л. А. С. Мельничук. Трубобетонные колонны квадратного сечения.. Жилищное строительство. – 2012. – №. 5. – С. 19-20.
6. Кришан, А. Л. Кришан А. Л., Мельничук А. С. .Прочность трубобетонных колонн квадратного сечения при осевом сжатии .Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. ГИ Носова. – 2012. – №. 3. – С. 51-54.
7. Кришан, А. Л. Прочность усовершенствованных трубобетонных элементов квадратного поперечного сечения / А. Л. Кришан, В. И. Римшин, М. А. Астафьева // Строительные материалы. – 2018. – №. 6. – С. 24-28.
8. Кришан, А. Л. Несущая способность трубобетонных колонн квадратного поперечного сечения / А. Л. Кришан, А. С. Мельничук // Инновации в отраслях народного хозяйства, как фактор решения социально-экономических проблем современности. – 2011. – С. 57-59.
9. Ma, D. Y. Behaviour of hexagonal concrete-encased CFST columns subjected to cyclic bending / D.Y. Ma, L.H. Han, X. Ji, W.B. Yang // Journal of Constructional Steel Research. – 2018. – Т. 144. – С. 283-294.
10. Xu, W. Performance of hexagonal CFST members under axial compression and bending / W. Xu, L.H. Han, W. Li // Journal of constructional steel research. – 2016. – Т. 123. – С. 162-175.
11. Hassanein, M. F. Behaviour and design of hexagonal concrete-filled steel tubular short columns under axial compression / M.

- F. Hassanein, V. I. Patel, M. Bock //Engineering Structures. – 2017. – Т. 153. – С. 732-748.
12. Fang, H. Structural performance of concrete-filled cold-formed high-strength steel octagonal tubular stub columns / H. Fang, T. M. Chan, B. Young //Engineering Structures. – 2021. – Т. 239. – С. 112360.
13. Хашхожев, К. Н. Расчет центрально сжатых трубобетонных колонн кольцевого сечения с учетом физической нелинейности / К. Н. Хашхожев, А. А. Аваков // Строительство и архитектура. – 2021. – Т. 9. – №3. – URL: <https://riordpub.com/ru/nauka/article/45575/view>
14. Krishan, A., Astafeva M. Strength and Deformability of the Concrete Core of Precompressed Concrete Filled Steel Tube Columns of Annular Cross-Section. MATEC Web of Conferences. EDP Sciences, 2019. – Т. 278. – С. 03002.
15. Krishan, A. L. The strength of short compressed concrete elements in a fiberglass shell / A. L. Krishan, M. Y. Narkevich, A. I. Sagadatov, V.I. Rimshin //Magazine of civil engineering. – 2020. – №. 2 (94). – С. 3-10.
16. Ouyang, Y. Finite element analysis of square concrete-filled steel tube (CFST) columns under axial compressive load / Y. Ouyang, A.K.H. Kwan //Engineering Structures. – 2018. – Т. 156. – С. 443-459.
17. Гениев, Г. А. Теория пластичности бетона и железобетона / Г. А. Гениев, В. Н. Киссюк, Г. А. Тюпин. – М.:Стройиздат, 1974. – 316 с.
18. Andreev, V. Calculation of Equal Strength Thick-Walled Concrete Cylinder with Free Ends / V. Andreev, I. Potekhin //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2019. – Т. 661. – №. 1. – С. 012023.
19. Narkevich, M. Y.. Strength and deformation property enhancement of compressed steel tube-concrete elements using super concrete and thin-shell structure / M. Y. Narkevich, A. I. Sagadatov //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2019. – Т. 687. – №. 3. – С. 033031.
20. Сагадатов, А. И. Напряженно-деформированное состояние сжатых трубобетонных элементов с внутренним стальным сердечником: дисс. ... канд. техн. наук : 05.23.01 /А.И. Сагадатов. - Магнитогорск, 2006. - 180 с.

References:

1. Rezvan A. V., Kolotienko M. A. Rationalization of technological, constructive and architectural solutions of pipe-concrete structures on the example of columns of high-rise buildings. *Inzhenernyy vestnik Dona*. 2020;(65). URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N5y2020/6475
2. Aadsan A., Tenemaza D. O., Kubasov A. Yu. Technical and economic calculation of metal, reinforced concrete and pipe concrete columns using computer systems. *Inzhenernyy vestnik Dona*. 2018;2(49). URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2018/5015
3. Duvanova I. A., Salmanov I. D. Pipe concrete columns in the construction of high-rise buildings and structures. *Construction of unique buildings and structures*. 2014; 6: 89-103.
4. Krishan A.L. Pipe-concrete columns for multi-storey buildings. *Construction mechanics of engineering structures and structures*. 2009; 4: 75-80.
5. Krishan A.L., Melnichuk A.S. Pipe-concrete columns of square section Housing construction. 2012; 5:19-20.
6. Krishan A.L., Melnichuk A.S. Strength of square pipe-concrete columns under axial compression. *Bulletin of the Magnitogorsk State Technical University*. 2012; 3: 51-54.
7. Krishan A. L., Rimshin V. I., Astafyeva M. A. Strength of improved square-section pipe-concrete elements. *Building materials*. 2018; 6.: 24-28.
8. Krishan A. L., Melnichuk A. S. Bearing capacity of pipe-concrete columns of square cross-section. Innovations in the branches of the national economy as a factor in solving social and economic problems of our time. 2011; 57-59.
9. Ma D. Y. et al. Behaviour of hexagonal concrete-encased CFST columns subjected to cyclic bending. *Journal of Constructional Steel Research*. 2018; 144: 283-294.
10. Xu W., Han L. H., Li W. Performance of hexagonal CFST members under axial compression and bending. *Journal of constructional steel research*. 2016; 123: 162-175.
11. Hassanein M. F., Patel V. I., Bock M. Behaviour and design of hexagonal concrete-filled steel tubular short columns under axial compression. *Engineering Structures*. 2017; 153: 732-748.
12. Fang H., Chan T. M., Young B. Structural performance of concrete-filled cold-formed high-strength steel octagonal tubular stub columns. *Engineering Structures*. 2021; 239: 112360.
13. Khashkhozhev K. N., Avakov A. A. Calculation of centrally compressed pipe-concrete columns of an annular section taking into account physical nonlinearity. *Construction and architecture*. 2021;9(3). URL: <https://riordpub.com/ru/nauka/article/45575/view>
14. Krishan A., Astafeva M. Strength and Deformability of the Concrete Core of Precompressed Concrete Filled Steel Tube Columns of Annular Cross-Section. MATEC Web of Conferences. EDP Sciences. 2019; 278: 03002.
15. Krishan A. L., Narkevich M.Y., Sagadatov A.I., Rimshin, V.I. The strength of short compressed concrete elements in a fiberglass shell. *Journal of civil engineering*. 2020; 2 (94): 3-10.
16. Ouyang Y., Kwan A. K. H. Finite element analysis of square concrete-filled steel tube (CFST) columns under axial compressive load. *Engineering Structures*. 2018; 156: 443-459.
17. Geniev G.A., Kissyuk G.A., Tyupin V.N. Teoriya plastichnosti betona i zhelezobetona [The theory of plasticity of concrete and reinforced concrete]. Moscow: Stroyizdat, 1974: 316.
18. Andreev V., Potekhin I. Calculation of Equal Strength Thick-Walled Concrete Cylinder with Free Ends. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2019; 661(1): 012023.
19. Narkevich M. Y., Sagadatov A. I. Strength and deformation property enhancement of compressed steel tube-concrete elements using super concrete and thin-shell structure. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2019; 687(3): 033031.
20. Sagadatov A. I. Stress-strain state of compressed concrete filled steel tubular elements with an internal steel core: PhD thesis; Magnitogorsk, 2006.

Сведения об авторах:

Хашхожев Казбек Нарзанович, аспирант кафедры «Сопротивление материалов»; kazbek_hash@mail.ru

Лесняк Любовь Ивановна, начальник Управления научно-исследовательской работы обучающихся; li.lesnyak@sci.donstu.ru

Курачев Раджаб Магомедович, аспирант; kurachev@mail.ru

Чепурненко Антон Сергеевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Сопротивление материалов», главный научный сотрудник Институт дизайна и пространственных искусств; anton_chepurnenk@mail.ru

Information about authors:

Kazbek N. Khashkhodzhev, Postgraduate Student, Department "Strength of Materials"; kazbek_hash@mail.ru

Lyubov I. Lesnyak, Head of the Department of Research Work of Students; li.lesnyak@sci.donstu.ru

Rajab M. Kurachev, Postgraduate Student; kurachev@mail.ru

Anton S. Chepurnenko, Dr. Sci. (Eng.), Prof.; Department "Strength of Materials", Chief Researcher of the Institute of Design and Spatial Arts; anton_chepurnenk@mail.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 04.10.2022

Одобрена после рецензирования/ Reviced 27.10.2022.

Принята в печать/Accepted for publication 27.10.2022.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 624.011

DOI: 10.21822/2073-6185-2022-49-4-194-203

Оригинальная статья / Original Paper

Особенности работы плоских большепролетных конструкций

А.К. Юсупов, Х.М. Муселемов, Р.И. Вишталов

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

Резюме. Цель. Целью исследования является доказательство особенностей работы плоских большепролетных конструкций, учитываемых также при их конструировании. **Метод.** Излагается методика, позволяющая уменьшить пролётные изгибающие моменты. Приводятся примеры рационального конструирования балочных ферм. **Результат.** Приведенные конструктивные схемы, а также анализ их работы позволяют проектировать большепролётные плоские системы в виде рамных и арочных конструкций, которые обладают высокой надёжностью, минимальным весом, а также высокой технологичностью при изготовлении, транспортировке и монтаже. **Вывод.** Конструктивные схемы, сечения и узлы сопряжения элементов находят применение в практике проектирования и строительства. Рациональные конструктивные решения позволяют уменьшить собственный вес плоских большепролетных конструкций, рам и арок за счёт оптимального выбора их конструктивной и расчётной схем.

Ключевые слова: плоские конструкции, рамные системы, арочные конструкции, распорные системы, надёжность, узлы, сечения

Для цитирования: А.К. Юсупов, Х.М. Муселемов, Р.И. Вишталов. Особенности работы плоских большепролетных конструкций. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022; 49 (4):194-203. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-4-194-203

Features of the work of flat large-span structures

A.K. Yusupov, H.M. Muselemov, R.I. Vishtalov

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

Abstract. Objective. The purpose of the study is to prove the features of the operation of large-span flat structures, which are also taken into account in their design. **Method.** A technique is presented that makes it possible to reduce span bending moments. Examples of rational design of beam trusses are given. **Result.** The given structural diagrams, as well as the analysis of their work, allow designing large-span flat systems in the form of frame and arch structures, which have high reliability, minimal weight, and high manufacturability in manufacturing, transportation and installation. **Conclusion.** The presented structural schemes, sections and junctions of elements are used in the practice of design and construction. Rational design solutions make it possible to reduce the own weight of flat large-span structures, frames and arches due to the optimal choice of their design and design schemes.

Keywords: flat structures, frame systems, arched structures, spacer systems, reliability, nodes, sections

For citation: A.K. Yusupov, Kh.M. Muselemov, R.I. Vishtalov. Features of the work of flat large-span structures. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2022; 49(4): 194-203. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-4-194-203.

Введение. К плоским большепролетным конструкциям можно отнести: балочные фермы; рамные системы; арочные конструкции. По затратам конструкционного материала плоские системы на 15-20% тяжелее, чем пространственные системы. Однако плоские большепролетные конструкции с точки зрения технологии изготовления, транспортировки и монтажа относи-

тельно просты и по этой причине находят широкое применение в практике проектирования и строительства [1-4]. В большепролетных зданиях широкое применение находят рамные и арочные конструкции. При этом различают по виду сечения рамы и арки сплошного сечения и сквозного сечения.

Постановка задачи. Целью исследования является разработка конструктивных приёмов арочных и рамных большепролетных конструкций с целью снижения собственного веса [5]. Элементы рам и арок по пролёту обычно выполняют переменного сечения [6,7] (сплошного (рис. - 1 и 4) и сквозного (рис. - 2 и 5) сечения).

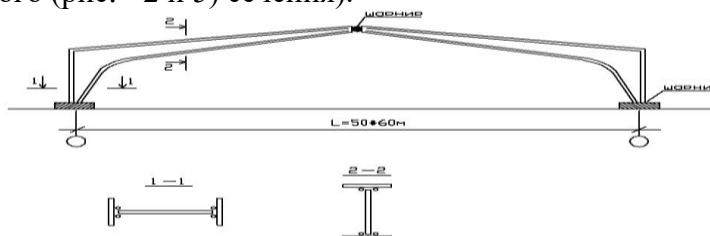


Рис.1. Трехшарнирная рама
 Fig.1. Tri-hinged frame

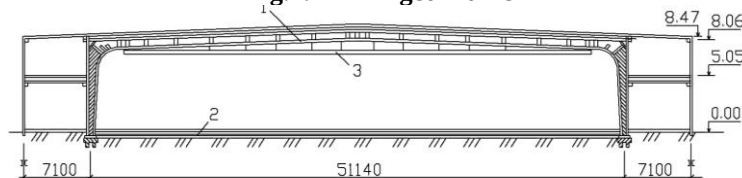


Рис.2. Двухшарнирная сплошная рама с застежкой: 1 –ригель; 2 –затяжка; 3 –монорельс
 Fig.2. Double-hinged solid frame with buckle: 1 - crossbar; 2 - puff; 3 - monorail

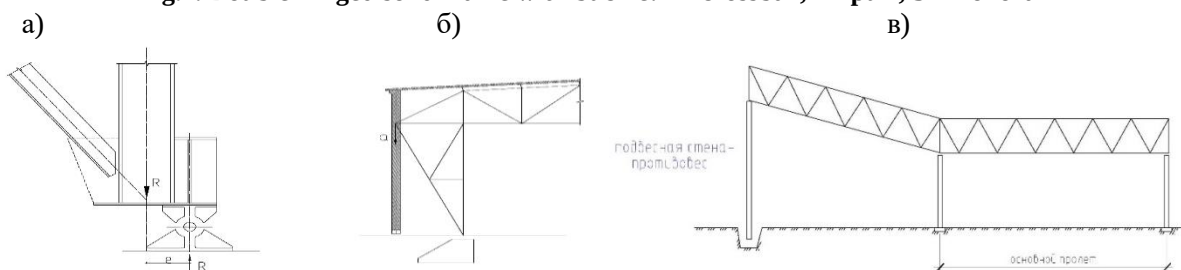


Рис.3. Примеры конструктивных схем, позволяющие уменьшить пролётный изгибающий момент:
 а) и б) эксцентричная посадка; в) устройство противовеса (подвесная стена)
 Fig.3. Examples of design schemes that allow to reduce the span bending moment:
 а) and б) eccentric fit; в) counterweight device (suspended wall)

Эксцентричная посадка колонны на фундаменты (рис. 3, а, б), а также устройство противовесов (рис. 3, в) вызывают изгибающие моменты обратного знака, которые, складываясь с моментами от собственного веса, уменьшают пролетный изгибающий момент.

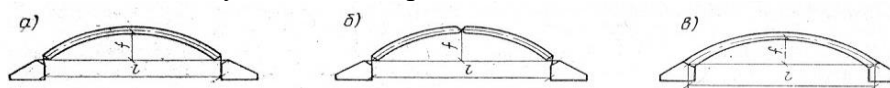


Рис. 4. Системы арок: а –двухшарнирная; б –трехшарнирная; в –бесшарнирная.
 Fig. 4. Arch systems: а - two-hinged; б - three-hinged; в - hingeless

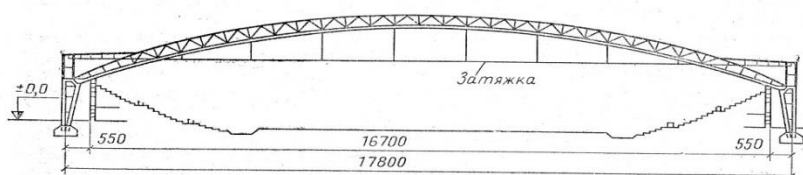


Рис. 5. Арка с приподнятой затяжкой образует рамно-арочную систему
 Fig. 5. An arch with a raised puff forms a frame-arch system

Методы исследования. Для снижения собственного веса арок и рам применяются различные конструктивные приёмы: опоры выполняют с эксцентричной посадкой, которые вызывают изгибающий момент обратного знака по отношению к моментам от собственного веса покрытия (рис.3); несущие конструкции выполняются переменного сечения по пролёту; для повышения жёсткости конструкции при минимальном весе предусматриваются пролётных строениях несущих конструкций сквозные сечения (за счёт захвата пространства при минимальном весе существенного увеличивается момент инерции сечения); с целью уменьшения пролётного изгибающего момента рамные и арочные системы обладают распором на опорах; для повышения несущей способности и жёсткости арочные и рамные системы предварительно напрягают с помощью высокопрочных канатов или высокопрочной полосовой стали; в трёхпролётных конструкциях применяются подвесные стены, которые играют роль противовесов, что существенно уменьшает изгибающие моменты в основном (среднем) пролёте (рис.4 и 5); рамные и арочные несущие конструкции выполняют из различных сталей (многостальные конструкции).

Удачно сочетая стали обычной и повышенной прочности, можно добиться существенного снижения собственного веса пролётного строения; применяя гибкие элементы (полосовые стали повышенной прочности, канаты), удаётся существенно увеличить пролёт рамной и арочной конструкции; рационально подбирая очертание арки, можно построить арку безмоментного контура (в виде параболы, когда действует равномерно-распределённая нагрузка); предусматривая в нужных местах шарнирное или жёсткое сопряжения, можно регулировать уровень напряжённого состояния несущих элементов пролётного строения. Сочетая различным способом приведенные выше конструктивные приёмы, можно получить множество вариантов арок и рам, при этом наиболее рациональное сочетание этих приёмов следует установить с помощью вариантного проектирования.

В практике проектирования арочных конструкций широкое применение находят арки кругового и параболического очертания. Каждая из этих очертаний арок имеет свои преимущества и недостатки.

Арка параболического очертания. Поскольку основной нагрузкой для большепролетной конструкции является её собственный вес, которая более или менее равномерно распределяется по пролету, то будем говорить именно относительно этой нагрузки. Арка параболического очертания от воздействия равномерно распределенной нагрузки – *безмомента*. Это позволяет уменьшить собственный вес арки. Естественно это является преимуществом параболического очертания. Однако, поскольку кривизна параболической арки – *переменная*, приходится компоновать такую арку из отправочных марок с различной кривизной. Это приводит к увеличению числа разнотипных отправочных марок, из которых komponуется параболическая арка. Усложняется технология изготовления и монтажа строительных конструкций. Естественно это является недостатком параболической арки.

Арка кругового очертания. *Преимущества:* поскольку арка кругового очертания имеет постоянную кривизну по пролету, то все отправочные марки можно проектировать одной кривизны. Если подобрать сечение арки для наиболее перегруженного участка и сохранить это сечение для всех остальных отправочных марок, то можно добиться высочайшей эффективности технологии изготовления и монтажа арки кругового очертания. Здесь число разнотипных отправочных марок, из которых komponуется арка круглого очертания *равно единице*. *Недостатки:* однако такое решение приводит к перерасходу металла. Как показывает опыт проектирования и возведения арочных покрытий, именно арки кругового очертания находят широкое применение в практике строительства. Для окончательного выбора рационального вида очертания арки и рационального вида сечения (сквозное или сплошное) необходимо выполнить вариантное проектирование арок с различными очертаниями и видами сечения. На основе вариантного проектирования, путем сравнения вариантов, можно выбрать рациональный вариант по тому или иному критерию: по общей стоимости покрытия, по минимуму расхода конструкционного материала, по срокам изготовления и монтажа здания или сооружения.

Обсуждение результатов. Исходные данные. Район строительства г.Томск. Длина здания 108 м. Пролет здания 84 м. Высота покрытия на коньке 18 м. Относительный прогиб по условиям эксплуатации $p_0 = 300$. Здание – одноэтажное, однопролетное. Материал основ-

ных несущих конструкций: сталь класса Вст3 и стали повышенной прочности – по обоснованному выбору. Материал ограждающих конструкций выбирается в соответствии с назначением здания и учетом района строительства.

Компоновка поперечной рамы. Выбрана несущая система с шагом поперечных рам 12 м. Схема поперечной рамы и ее элементов показана на (рис. 6, а).

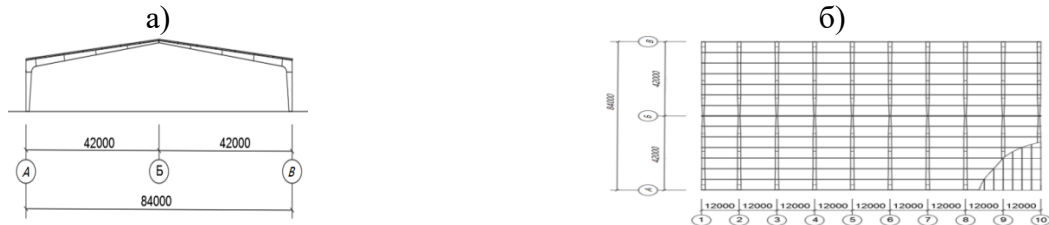


Рис. 6. Компоновка здания из рам (размеры в мм):

а) поперечный разрез рамы;

б) схема расположения рам в плане

Fig. 6. Layout of the building from frames (dimensions in mm):

а) cross section of the frame;

б) the layout of the frames in the plan

Расчет нагрузок на поперечную раму

Все нагрузки подсчитываются с учетом коэффициента надежности по назначению здания – $\gamma_n = 0,95$. В рассматриваемом здании к независимым нагрузкам относятся [10],[11]: постоянные нагрузки от собственного веса; снеговые (двусторонние); снеговые (односторонние); ветровые.

1) Постоянная нагрузка

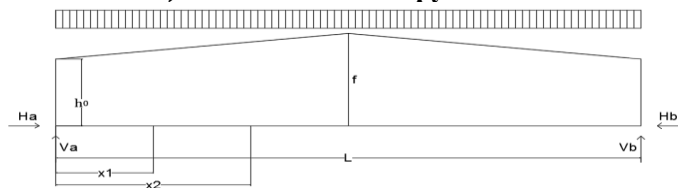


Рис.7. Расчётная схема поперечной рамы

Fig.7. Calculation scheme of the transverse frame

Постоянная нагрузка включает в себя вес рамы, вес шпренгельных балок и вес покрытия.

$$\text{Вес рамы: } q_{\text{рм}} = 0.05 \cdot q_{\text{сн}} = 0.05 \cdot 27.34 \frac{\text{кН}}{\text{м}} = \frac{1.37 \text{ кН}}{\text{м}}.$$

Вес шпренгельных балок:

$$q_{\text{шб}} = 0.1 \cdot q_{\text{сн}} = 0.1 \cdot 27.34 \frac{\text{кН}}{\text{м}} = \frac{2.74 \text{ кН}}{\text{м}}.$$

Вес покрытия: $q_{\text{пк}} = 2.73 \text{ кН/м}$.

Общий вес: $q_{\text{пс}} = q_{\text{рм}} + q_{\text{шб}} + q_{\text{пк}} = 1.37 + 2.74 + 2.73 = 6.84 \text{ кН/м}$,

где c – коэффициент перехода от нагрузки на земле к нагрузке на 1 м^2 проекции кровли, равный при угле $\alpha < 25^\circ$ единице; n – коэффициент перегрузки; $b_{\text{ф}}$ – шаг ферм.

Опорные реакции рамы (рис. 7).

Вертикальные реакции:

$$\Sigma M_a = 0; V_b \cdot L - q_{\text{сн}} \cdot \frac{L^2}{2} = \frac{6.84 \text{ кН}}{\text{м}} \cdot \frac{(84 \text{ м})^2}{2} = 0; V_b = q_{\text{сн}} \cdot \frac{L}{2} = 287.3 \text{ кН}$$

$$\Sigma M_b = 0; V_a \cdot L - q_{\text{сн}} \cdot \frac{L^2}{2} = \frac{6.84 \text{ кН}}{\text{м}} \cdot \frac{(84 \text{ м})^2}{2} = 0; (84 \text{ м})^2$$

$$V_a = q_{\text{сн}} \cdot \frac{L}{2} = V_b = 287.3 \text{ кН}$$

Горизонтальные реакции: $\Sigma M^{\text{сл}} = 0; H_a \cdot f + q_{\text{сн}} \cdot \frac{L^2}{8} - V_a \cdot \frac{L}{2} = 0; H_a = (V_a \cdot \frac{L}{2} - q_{\text{сн}} \cdot \frac{L^2}{8}) =$

$$335.2 \text{ кН} \quad \Sigma M^{\text{сп}} = 0; V_b \cdot \frac{L}{2} - q_{\text{сн}} \cdot \frac{L^2}{8} - H_b \cdot f = 0; H_b = (V_b \cdot \frac{L}{2} - q_{\text{сн}} \cdot \frac{L^2}{8})/f = 335.2 \text{ кН}$$

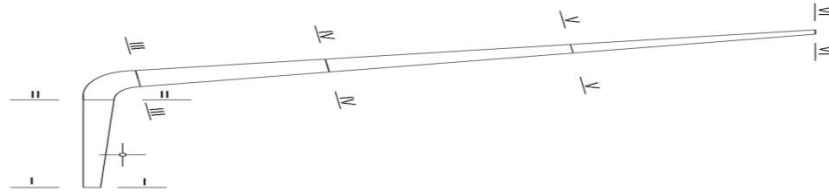


Рис.8. Расположения расчётных сечений полурамы
Fig.8. Locations of calculated sections of the semi-frame

Усилия в сечении I-I (рис.8): $M_{I-I} = 0$; $Q_{I-I} = H_a = 335.2 \text{ kH}$; $N_{I-I} = V_a = 287.3 \text{ kH}$;

Усилия в сечении II-II: $M_{II-II} = H_a \cdot f = 4357.1 \text{ kHm}$; $Q_{II-II} = H_a = 335.2 \text{ kH}$;

$N_{II-II} = V_a = 287.3 \text{ kH}$;

Усилия в сечении III-III: $M_{III-III} = M_{II-II} = 4357.1 \text{ kHm}$; $Q_{III-III} = V_a = 287.3 \text{ kH}$;

$N_{III-III} = H_a = 335.2 \text{ kH}$;

Усилия в сечении IV-IV: $M_{IV-IV} = H_a \cdot h_{14} - V_a \cdot x_1 + q_{\text{сн}} \cdot \frac{x_1^2}{2} = 1564.1 \text{ kHm}$

$Q_{IV-IV} = V_a - q_{\text{сн}} \cdot x_1 = 191.5 \text{ kH}$; $N_{IV-IV} = H_a = 335.2 \text{ kH}$;

Усилия в сечении V-V: $M_{V-V} = H_a \cdot h_{28} - V_a \cdot x_2 + q_{\text{сн}} \cdot \frac{x_2^2}{2} = 111.7 \text{ kHm}$

$Q_{V-V} = V_a - q_{\text{сн}} \cdot x_2 = 95.8 \text{ kH}$; $N_{V-V} = H_a = 335.2 \text{ kH}$;

Усилия в сечении VI-VI: $M_{VI-VI} = 0$; $Q_{VI-VI} = V_a - q_{\text{сн}} \cdot \frac{L}{2} = 0$; $N_{VI-VI} = H_a = 335.2 \text{ kH}$;

2) Снеговая (двусторонняя) нагрузка

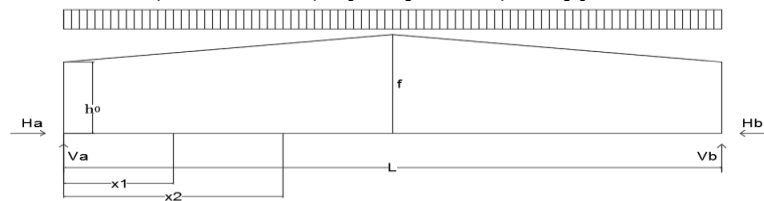


Рис.9. Снеговая нагрузка, действующая на раму

Fig.9. Snow load acting on the frame

Погонная распределенная нагрузка от снега на ригель рамы определяется по ле: $q_{\text{сн}} = \gamma_n \cdot n \cdot c \cdot S_g \cdot b_{\phi} = 0.95 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 2.4 \text{ кПа} \cdot 12 \text{ м} = 27.34 \text{ кН/м}$

где c – коэффициент перехода от нагрузки на земле к нагрузке на 1 м^2 проекции кровли, равный при уклоне $\alpha < 25^\circ$ единице; n – коэффициент перегрузки; b_{ϕ} – шаг ферм.

Опорные реакции (рис.9.).

Вертикальные реакции: $\Sigma M_a = 0$; $V_b \cdot L - q_{\text{сн}} \cdot \frac{L^2}{2} = \frac{27.34 \text{ кН}}{\text{м}} \cdot \frac{24 \text{ м}}{2} = 0$; $V_b = q_{\text{сн}} \cdot \frac{L}{2} = 1150.8 \text{ кН}$

$\Sigma M_b = 0$; $V_a \cdot L - q_{\text{сн}} \cdot \frac{L^2}{2} = \frac{27.34 \text{ кН}}{\text{м}} \cdot \frac{24 \text{ м}}{2} = 0$; $V_a = q_{\text{сн}} \cdot \frac{L}{2} = V_b = 1150.8 \text{ кН}$

Горизонтальные реакции: $\Sigma M^{\text{сн}} = 0$; $H_a \cdot f + q_{\text{сн}} \cdot \frac{L^2}{8} - V_a \cdot \frac{L}{2} = 0$; $H_a = (V_a \cdot \frac{L}{2} - q_{\text{сн}} \cdot \frac{L^2}{8}) / f = 1342.6 \text{ кН}$

$\Sigma M^{\text{сп}} = 0$; $V_b \cdot \frac{L}{2} - q_{\text{сн}} \cdot \frac{L^2}{8} - H_b \cdot f = 0$; $H_b = (V_b \cdot \frac{L}{2} - q_{\text{сн}} \cdot \frac{L^2}{8}) / f = 1342.6 \text{ кН}$

Усилия в сечении I-I (рис. 8): $M_{I-I} = 0$; $Q_{I-I} = H_a = 1342.6 \text{ кН}$; $N_{I-I} = V_a = 1150.8 \text{ кН}$;

Усилия в сечении II-II: $M_{II-II} = H_a \cdot f = 17453.8 \text{ кНм}$; $Q_{II-II} = H_a = 1342.6 \text{ кН}$;

$N_{II-II} = V_a = 1150.8 \text{ кН}$;

Усилия в сечении III-III: $M_{III-III} = M_{II-II} = 17453.8 \text{ кНм}$; $Q_{III-III} = V_a = 1150.8 \text{ кН}$;

$N_{III-III} = H_a = 1342.6 \text{ кН}$;

Усилия в сечении IV-IV: $M_{IV-IV} = H_a \cdot h_{14} - V_a \cdot x_1 + q_{\text{сн}} \cdot \frac{x_1^2}{2} = 7854.7 \text{ кНм}$ $Q_{IV-IV} = V_a - q_{\text{сн}} \cdot x_1 = 767.2 \text{ кН}$; $N_{IV-IV} = H_a = 1342.6 \text{ кН}$;

Усилия в сечении V-V: $M_{V-V} = H_a \cdot h_{28} - V_a \cdot x_2 + q_{\text{сн}} \cdot \frac{x_2^2}{2} = 447.5 \text{ кНм}$

$Q_{V-V} = V_a - q_{\text{сн}} \cdot x_2 = 383.6 \text{ кН}$; $N_{V-V} = H_a = 1342.6 \text{ кН}$;

Усилия в сечении VI-VI: $M_{VI-VI} = 0$; $Q_{VI-VI} = V_a - q_{\text{сн}} \cdot \frac{L}{2} = 0$; $N_{VI-VI} = H_a = 1342.6 \text{ кН}$;

3) Снеговая (односторонняя) нагрузка

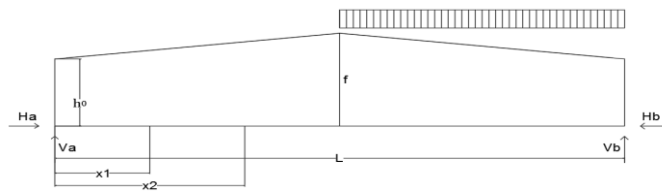


Рис. 10. Снеговая односторонняя нагрузка на раму

Fig. 10. Snow one-sided load on the frame

Погонная распределенная нагрузка от снега на ригель рамы определяется по ле: $q_{сн} = \gamma_n \cdot n \cdot c \cdot S_g \cdot b_{\phi} = 0.95 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 2.4 \text{ кПа} \cdot 12 \text{ м} = 27.34 \text{ кН/м}$

где c – коэффициент перехода от нагрузки на земле к нагрузке на 1 м^2 проекции кровли, равный при угле $\alpha < 25^\circ$ единице; n – коэффициент перегрузки; b_{ϕ} – шаг ферм.

Опорные реакции (рис.10).

$$\text{Вертикальные реакции: } \Sigma M_a = 0; V_b \cdot L - q_{сн} \cdot \frac{3L^2}{8} = \frac{28.73 \text{ кН}}{\text{м}} \cdot \frac{24 \text{ м}}{2} = 0; V_b = q_{сн} \cdot \frac{3L}{8} = 863.1 \text{ кН}$$

$$\Sigma M_b = 0; V_a \cdot L - q_{сн} \cdot \frac{L^2}{8} = \frac{28.73 \text{ кН}}{\text{м}} \cdot \frac{24 \text{ м}}{2} = 0; V_a = q_{сн} \cdot \frac{L}{8} = 287.7 \text{ кН}$$

$$\text{Горизонтальные реакции: } \Sigma M^{сл} = 0; H_a \cdot f - V_a \cdot \frac{L}{2} = 0; H_a = V_a \cdot \frac{L}{2f} = 671.3 \text{ кН}$$

$$\Sigma M^{сп} = 0; V_b \cdot \frac{L}{2} - q_{сн} \cdot \frac{L^2}{8} - H_b \cdot f = 0; H_b = (V_b \cdot \frac{L}{2} - q_{сн} \cdot \frac{L^2}{8}) / f = 671.3 \text{ кН}$$

Усилия в сечениях левой части рамы.

$$\text{Усилия в сечении I-I (рис. 8): } M_{I-I} = 0; Q_{I-I} = H_a = 671.3 \text{ кН}; N_{I-I} = V_a = 287.7 \text{ кН};$$

$$\text{Усилия в сечении II-II: } M_{II-II} = H_a \cdot f = 8726.9 \text{ кНм}; Q_{II-II} = H_a = 671.3 \text{ кН};$$

$$N_{II-II} = V_a = 287.7 \text{ кН};$$

Усилия в сечении III-III:

$$M_{III-III} = M_{II-II} = 8726.9 \text{ кНм}; Q_{III-III} = V_a = 287.7 \text{ кН}; N_{III-III} = H_a = 671.3 \text{ кН};$$

$$\text{Усилия в сечении IV-IV: } M_{IV-IV} = H_a \cdot h_{14} - V_a \cdot x_1 = 5817.9 \text{ кНм} \quad Q_{IV-IV} = V_a = 287.7 \text{ кН}; N_{IV-IV} = H_a = 671.3 \text{ кН};$$

$$\text{Усилия в сечении V-V: } M_{V-V} = H_a \cdot h_{28} - V_a \cdot x_2 = 2909 \text{ кНм} \quad Q_{V-V} = V_a = 287.7 \text{ кН};$$

$$N_{V-V} = H_a = 671.3 \text{ кН};$$

$$\text{Усилия в сечении VI-VI: } M_{VI-VI} = 0; Q_{VI-VI} = V_a = 287.7 \text{ кН}; N_{VI-VI} = H_a = 671.3 \text{ кН}.$$

Усилия в сечениях правой части рамы.

$$\text{Усилия в сечении I-I: } M_{I-I} = 0; Q_{I-I} = H_a = 671.3 \text{ кН}; N_{I-I} = V_a = 863.1 \text{ кН};$$

$$\text{Усилия в сечении II-II: } M_{II-II} = H_a \cdot f = 8726.9 \text{ кНм}; Q_{II-II} = H_a = 671.3 \text{ кН};$$

$$N_{II-II} = V_a = 863.1 \text{ кН};$$

$$\text{Усилия в сечении III-III: } M_{III-III} = M_{II-II} = 8726.9 \text{ кНм}; Q_{III-III} = V_b = 863.1 \text{ кН};$$

$$N_{III-III} = H_a = 671.3 \text{ кН};$$

$$\text{Усилия в сечении IV-IV: } M_{IV-IV} = H_a \cdot h_{14} - V_a \cdot x_1 + q_{сн} \cdot \frac{x_1^2}{2} = 447.5 \text{ кНм}$$

$$Q_{IV-IV} = V_a - q_{сн} \cdot x_1 = 479.5 \text{ кН}; N_{IV-IV} = H_a = 671.3 \text{ кН};$$

$$\text{Усилия в сечении V-V: } M_{V-V} = H_a \cdot h_{28} - V_a \cdot x_2 + q_{сн} \cdot \frac{x_2^2}{2} = -2461.4 \text{ кНм}$$

$$Q_{V-V} = V_a - q_{сн} \cdot x_2 = 95.9 \text{ кН}; N_{V-V} = H_a = 671.3 \text{ кН};$$

$$\text{Усилия в сечении VI-VI: } M_{VI-VI} = 0; Q_{VI-VI} = V_a - q_{сн} \cdot \frac{L}{2} = -287.1 \text{ кН}; N_{VI-VI} = H_a = 671.3 \text{ кН};$$

4) Ветровая нагрузка

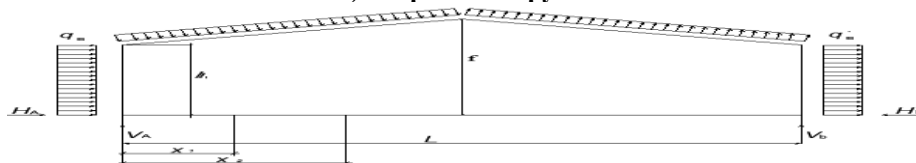


Рис. 11. Схема ветровых нагрузок

Fig. 11. Scheme of wind loads

Погонная ветровая нагрузка задается в СП [9] и зависит от высоты и от рельефа местности, в данной работе ветровая нагрузка для г. Томск: $q_{B10} = 1.906 \text{ кН/м}$ $q_{B20} = 2.499 \text{ кН/м}$
Опорные реакции (рис. 11).

$$\begin{aligned} \text{Вертикальные реакции: } \Sigma M_a = 0; & V_b \cdot L - q_{B10} \cdot 10 \cdot 5 - \frac{(q_{B20} - q_{B10}) \cdot \frac{3}{10} + q_{B10}}{2} \cdot 3 \cdot 11.5 \cdot \frac{0.6}{0.8} - \\ & \frac{(q_{B20} - q_{B10}) \cdot \frac{8}{10} + (q_{B20} - q_{B10}) \cdot \frac{3}{10}}{2} \cdot 3 \cdot 0.8 \cdot 11.5 \cdot \frac{0.2}{0.8} = 0; V_b = 5 \text{ кН} \\ \Sigma M_a = 0; & q_{B10} \cdot 10 \cdot 5 - \frac{(q_{B20} - q_{B10}) \cdot \frac{3}{10} + q_{B10}}{2} \cdot 3 \cdot 11.5 \cdot \frac{0.6}{0.8} - \frac{(q_{B20} - q_{B10}) \cdot \frac{8}{10} + (q_{B20} - q_{B10}) \cdot \frac{3}{10}}{2} \cdot 3 \cdot 0.8 \cdot 11.5 \cdot \frac{0.2}{0.8} - V_a \cdot L = 0; \\ & V_a = -5 \text{ кН} \end{aligned}$$

Горизонтальные реакции: $\Sigma M^{cl} = 0$; $H_a = -28.3 \text{ кН}$ $\Sigma M^{cp} = 0$; $H_b = -23.9 \text{ кН}$

Усилия в сечениях левой части

Усилия в сечении I-I: $M_{I-I} = 0$; $Q_{I-I} = H_a = -28.3 \text{ кН}$; $N_{I-I} = V_a = -5 \text{ кН}$;
Усилия в сечении II-II: $M_{II-II} = -203.6 \text{ кНм}$; $Q_{II-II} = -3.2 \text{ кН}$; $N_{II-II} = V_a = -5 \text{ кН}$;
Усилия в сечении III-III: $M_{III-III} = M_{II-II} = -203.6 \text{ кНм}$;

$Q_{III-III} = V_a = -5 \text{ кН}$; $N_{III-III} = -3.2 \text{ кН}$;

Усилия в сечении IV-IV: $M_{IV-IV} = -91.6 \text{ кНм}$ $Q_{IV-IV} = V_a = -5 \text{ кН}$; $N_{IV-IV} = -1.4 \text{ кН}$;

Усилия в сечении V-V: $M_{V-V} = -5.2 \text{ кНм}$ $Q_{V-V} = V_a = -5 \text{ кН}$; $N_{V-V} = -0.5 \text{ кН}$;

Усилия в сечении VI-VI: $M_{VI-VI} = 0$; $Q_{VI-VI} = V_a = -5 \text{ кН}$; $N_{VI-VI} = 2.3 \text{ кН}$;

Усилия в сечениях правой части

Усилия в сечении I-I: $M_{I-I} = 0$; $Q_{I-I} = H_a = -23.9 \text{ кН}$; $N_{I-I} = V_a = 5 \text{ кН}$;

Усилия в сечении II-II: $M_{II-II} = -187.8 \text{ кНм}$; $Q_{II-II} = -5.1 \text{ кН}$; $N_{II-II} = V_a = 5 \text{ кН}$;

Усилия в сечении III-III: $M_{III-III} = M_{II-II} = -187.8 \text{ кНм}$;

$Q_{III-III} = V_a = 5 \text{ кН}$; $N_{III-III} = -5.1 \text{ кН}$;

Усилия в сечении IV-IV: $M_{IV-IV} = -85.4 \text{ кНм}$ $Q_{IV-IV} = V_a = 5 \text{ кН}$; $N_{IV-IV} = -4.2 \text{ кН}$;

Усилия в сечении V-V: $M_{V-V} = -4.8 \text{ кНм}$ $Q_{V-V} = V_a = 5 \text{ кН}$; $N_{V-V} = -3.3 \text{ кН}$;

Усилия в сечении VI-VI: $M_{VI-VI} = 0$; $Q_{VI-VI} = V_a = 5 \text{ кН}$; $N_{VI-VI} = 2.3 \text{ кН}$;

Все полученные значения занесем в табл.1.

Таблица1. Усилия и моменты в сечениях рамы
Table 1. Forces and moments in frame sections

Наименование	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		
Постоянная	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
Снеговая	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
Снеговая односторонняя (слева)	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
Снеговая односторонняя (справа) ⁸	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
Ветровая (слева)	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
Ветровая (справа) ⁸	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

Составление сочетаний нагрузок в сечениях рамы, и определение усилий для подбора сечения (табл.2). В рассматриваемом большепролетном здании к независимым нагрузкам относятся: остоянные нагрузки от собственного веса; снеговые; снеговые (односторонние); ветровые.

Таблица 2. Сочетания нагрузок [11].

основные сочетания: 1П+1Кр*1; особые сочетания: 1П+1Дл*0,9+3Кр*0,9.

Table 2. Combinations of loads [11].

basic combinations: 1P + 1Kr * 1; special combinations: 1P + 1Dl * 0.9 + 3Cr * 0.9.

Сечение 1-1			
№	Основные сочетания basic combinations	№	Особые сочетания special combinations
1; 4; 4*	$M_{спрв} = 0 + 0 * 1 = 0$ $M_{слв} = 0 + 0 * 1 = 0$ $Q_{спрв} = 335,2 - 28,3 * 1 = 306,9$ $Q_{слв} = 335,2 - 23,9 * 1 = 311,3$ $N_{спрв} = 287,2 - 5 * 1 = 282,2$ $N_{слв} = 287,2 + 5 * 1 = 292,2$	1; 2; 4; 4*	$M_{спрв} = 0 + 0 * 0,9 + 0 * 0,9 = 0$ $M_{слв} = 0 + 0 * 0,9 + 0 * 0,9 = 0$ $Q_{спрв} = 335,2 + 1342,6 * 0,9 - 28,3 * 0,9 = 1518$ $Q_{слв} = 335,2 + 1342,6 * 0,9 - 23,9 * 0,9 = 1522$ $N_{спрв} = 287,2 + 1150,8 * 0,9 - 5 * 0,9 = 1318,6$ $N_{слв} = 287,2 + 1150,8 * 0,9 + 5 * 0,9 = 1327,4$
Сечение 2-2			
1; 4; 4*	$M_{спрв} = 4357 - 203,6 * 1 = 4153,4$ $M_{слв} = 4357 - 187,8 * 1 = 4169,2$ $Q_{спрв} = 335,2 - 3,2 * 1 = 332$ $Q_{слв} = 335,2 - 5,1 * 1 = 330,1$ $N_{спрв} = 287,2 - 5 * 1 = 282,2$ $N_{слв} = 287,2 + 5 * 1 = 292,2$	1; 2; 4; 4*	$M_{спрв} = 4357 + 17453,8 * 0,9 - 203,6 * 0,9 = 19882,3$ $M_{слв} = 4357 + 17453,8 * 0,9 - 187,8 * 0,9 = 19896,5$ $Q_{спрв} = 335,2 + 1342,6 * 0,9 - 3,2 * 0,9 = 1540,8$ $Q_{слв} = 335,2 + 1342,6 * 0,9 - 5,1 * 0,9 = 1538,9$ $N_{спрв} = 287,2 + 1150,8 * 0,9 - 5 * 0,9 = 1318,6$ $N_{слв} = 287,2 + 1150,8 * 0,9 + 5 * 0,9 = 1327,4$
Сечение 3-3			
1; 4; 4*	$M_{спрв} = 4357 - 203,6 * 1 = 4153,4$ $M_{слв} = 4357 - 187,8 * 1 = 4169,2$ $Q_{спрв} = 287,2 - 5 * 1 = 282,2$ $Q_{слв} = 287,2 + 5 * 1 = 292,2$ $N_{спрв} = 335,2 - 3,2 * 1 = 332$ $N_{слв} = 335,2 - 5,1 * 1 = 330,1$	1; 2; 4; 4*	$M_{спрв} = 4357 + 17453,8 * 0,9 - 203,6 * 0,9 = 19882,3$ $M_{слв} = 4357 + 17453,8 * 0,9 - 187,8 * 0,9 = 19896,5$ $Q_{спрв} = 287,2 + 1150,8 * 0,9 - 5 * 0,9 = 1318,6$ $Q_{слв} = 287,2 + 1150,8 * 0,9 + 5 * 0,9 = 1327,4$ $N_{спрв} = 335,2 + 1342,6 * 0,9 - 3,2 * 0,9 = 1540,8$ $N_{слв} = 335,2 + 1342,6 * 0,9 - 5,1 * 0,9 = 1538,9$
Сечение 4-4			
1; 4; 4*	$M_{спрв} = 1564 - 91,6 * 1 = 1472,4$ $M_{слв} = 1564 - 85,4 * 1 = 1478,6$ $Q_{спрв} = 191,5 - 5 * 1 = 186,5$ $Q_{слв} = 191,5 + 5 * 1 = 196,5$ $N_{спрв} = 335,2 - 1,4 * 1 = 333,8$ $N_{слв} = 335,2 - 4,2 * 1 = 331$	1; 2; 4; 4*	$M_{спрв} = 1564 + 7854,7 * 0,9 - 91,6 * 0,9 = 8550,8$ $M_{слв} = 1564 + 7854,7 * 0,9 - 85,4 * 0,9 = 8556,4$ $Q_{спрв} = 191,5 + 767,2 * 0,9 - 5 * 0,9 = 877,5$ $Q_{слв} = 191,5 + 767,2 * 0,9 + 5 * 0,9 = 886,5$ $N_{спрв} = 335,2 + 1342,6 * 0,9 - 1,4 * 0,9 = 1542,2$ $N_{слв} = 335,2 + 1342,6 * 0,9 - 4,2 * 0,9 = 1539,8$
Сечение 5-5			
1; 4; 4*	$M_{спрв} = 111,7 - 5,2 * 1 = 106,5$ $M_{слв} = 111,7 - 4,8 * 1 = 106,9$ $Q_{спрв} = 95,7 - 5 * 1 = 90,7$ $Q_{слв} = 95,7 + 5 * 1 = 100,7$ $N_{спрв} = 335,2 - 0,5 * 1 = 334,7$ $N_{слв} = 335,2 - 3,3 * 1 = 331,9$	1; 2; 3; 3*; 4; 4*	$M_{спрв} = 111,7 + 2909 * 0,9 - 5,2 * 0,9 = 2725,1$ $M_{слв} = 111,7 - 2461,4 * 0,9 - 4,8 * 0,9 = -2107,9$ $Q_{спрв} = 95,7 + 383,6 * 0,9 - 5 * 0,9 = 436,5$ $Q_{слв} = 95,7 + 383,6 * 0,9 + 5 * 0,9 = 445,5$ $N_{спрв} = 335,2 + 1342,6 * 0,9 - 0,5 * 0,9 = 1543,1$ $N_{слв} = 335,2 + 1342,6 * 0,9 - 3,3 * 0,9 = 1540,6$
Сечение 6-6			
1; 4; 4*	$M_{спрв} = 0 - 0 * 1 = 0$ $M_{слв} = 0 - 0 * 1 = 0$ $Q_{спрв} = 0 - 5 * 1 = -5$ $Q_{слв} = 0 + 5 * 1 = 5$ $N_{спрв} = 335,2 + 2,4 * 1 = 337,6$ $N_{слв} = 335,2 - 2,4 * 1 = 332,8$	1; 2; 3; 3*; 4; 4*	$M_{спрв} = 0 + 0 * 0,9 - 0 * 0,9 = 0$ $M_{слв} = 0 + 0 * 0,9 - 0 * 0,9 = 0$ $Q_{спрв} = 0 + 287,7 * 0,9 - 5 * 0,9 = 254,4$ $Q_{слв} = 0 - 287,7 * 0,9 + 5 * 0,9 = -254,4$ $N_{спрв} = 335,2 + 1342,6 * 0,9 + 2,4 * 0,9 = 1545,7$ $N_{слв} = 335,2 + 1342,6 * 0,9 - 2,4 * 0,9 = 1541,4$

Рассматриваются 6 сечений. При подборе сечения необходимо обеспечивать технологичность изготовления конструкции [8]. Рама в сечении представляет собой двутавр. Изначально зададимся геометрическими размерами и маркой стали, затем подберём сечение согласно 4-ой теории прочности.

Подбор сечений (рис.8). Сечение I-I:

Усилия в сечении (из табл.1 и 2): $M = 0 \text{ кН} \cdot \text{м}$, $Q = 1522 \text{ кН}$, $N = 1327,4 \text{ кН}$. Высота сечения $H = 1000 \text{ мм}$. Ширина полок $B = 1000 \text{ мм}$. Толщина стенки $b = 10 \text{ мм}$. Толщина поясов $h_1 = 20 \text{ мм}$.

Площадь двутавра $A = 2 * B * h_1 + b * h = 2 * 100 * 2 + 1 * 96,00 = 496,0 \text{ см}^2$

Момент инерции $J_x = (B * H^3 - 2 * b * h^3) / 12 = (100 * 100^3 - 2 * 49,50 * 96,00^3) / 12 = 1034261,3 \text{ см}^4$.

Момент сопротивления изгибу

$$W = (B \cdot H^3 - 2 \cdot b \cdot h^3) / (6 \cdot H) = (100 \cdot 100^3 - 2 \cdot 49.50 \cdot 96.00^3) / (6 \cdot 100) = 20685.2 \text{ см}^3.$$

$$\text{Напряжение от изгиба } \sigma_{\text{и}} = \frac{M}{W} = 0 < y \cdot R = 0.9 \cdot 24 = 21.6 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2};$$

$$\text{Напряжение от сжатия } \sigma_{\text{сж}} = \frac{N}{A} = \frac{1327.4}{496} = 2.7 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} < y \cdot R = 0.9 \cdot 24 = 21.6 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2};$$

$$\text{Касательные напряжения } \tau = \frac{Q \cdot S}{J \cdot b} = \frac{1327.4 \cdot 10912}{1034261.3 \cdot 1} = 14 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} < y \cdot R = 0.9 \cdot 24 = 21.6 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2};$$

$$\text{Условие прочности по 4-й теории прочности } \sigma = \sqrt{(\sigma_{\text{и}} + \sigma_{\text{сж}})^2 + 3\tau^2} < y \cdot R;$$

В середине сечения $\sigma_{\text{и}} = 0$

$$\sigma = \sqrt{(\sigma_{\text{сж}})^2 + 3\tau^2} = \sqrt{(2.7)^2 + 3 \cdot 14^2} = 24.4 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} > y \cdot R = 0.9 \cdot 24 = 21.6 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2};$$

В нижних фибрах

$$\sigma = \sqrt{(\sigma_{\text{и}} + \sigma_{\text{сж}})^2} = \sqrt{(0 + 2.7)^2} = 2.7 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} < y \cdot R = 0.9 \cdot 24 = 21.6 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2};$$

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 сечений (рис.8) Сечение II-II:

Усилия в сечении (из табл.1 и 2): $M = 19896.5 \text{ кН} \cdot \text{м}$, $Q = 1540.8 \text{ кН}$, $N = 1327.4 \text{ кН}$. Высота сечения $H = 2000 \text{ мм}$. Ширина полков $B = 1200 \text{ мм}$. Толщина стенки $b = 10 \text{ мм}$. Толщина поясов $h_1 = 20 \text{ мм}$.

$$\text{Площадь двутавра } A = 2 \cdot B \cdot h_1 + b \cdot h = 2 \cdot 120 \cdot 2 + 1 \cdot 196.0 = 676.0 \text{ см}^2$$

$$\text{Момент инерции } J_x = (B \cdot H^3 - 2 \cdot b \cdot h^3) / 12 = (120 \cdot 200^3 - 2 \cdot 59.50 \cdot 196.0^3) / 12 = 5332101.3 \text{ см}^4.$$

$$\text{Момент сопротивления } W = (B \cdot H^3 - 2 \cdot b \cdot h^3) / (6 \cdot H) = (120 \cdot 200^3 - 2 \cdot 59.50 \cdot 196.0^3) / (6 \cdot 200) = 53321.0 \text{ см}^3.$$

$$\text{Напряжение от изгиба } \sigma_{\text{и}} = \frac{M}{W} = \frac{1989650}{53321} = 37.3 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} < y \cdot R = 0.9 \cdot 44 = 39.6 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2};$$

$$\text{Напряжение от сжатия } \sigma_{\text{сж}} = \frac{N}{A} = \frac{1327.4}{676} = 2 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} < y \cdot R = 0.9 \cdot 44 = 39.6 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2};$$

$$\text{Касательные напряжения } \tau = \frac{Q \cdot S}{J \cdot b} = \frac{1540.8 \cdot 20424.5}{5332101.3 \cdot 1} = 5.9 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} < y \cdot R = 0.9 \cdot 44 = 39.6 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2};$$

$$\text{Условие прочности по 4-й теории прочности } \sigma = \sqrt{(\sigma_{\text{и}} + \sigma_{\text{сж}})^2 + 3\tau^2} < y \cdot R;$$

$$\text{В середине сечения } \sigma_{\text{и}} = 0 \quad \sigma = \sqrt{(\sigma_{\text{сж}})^2 + 3\tau^2} = \sqrt{(2)^2 + 3 \cdot 5.9^2} = 10.4 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} < y \cdot R = 0.9 \cdot 44 = 39.6 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2};$$

$$\text{В нижних фибрах } \sigma = \sqrt{(\sigma_{\text{и}} + \sigma_{\text{сж}})^2} = \sqrt{(37.3 + 2)^2} = 39.3 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} < y \cdot R = 0.9 \cdot 44 = 39.6 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2};$$

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.

Проектирование базы колонны. Требуется запроектировать базу колонны сквозного сечения. Материал базы сталь марки ВСП5л-1.

$$R = 215 \text{ МПа} = 21.5 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}; \quad \text{при } t=4-20 \text{ мм}$$

$$R = 205 \text{ МПа} = 20.5 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}; \quad \text{при } t=21-40 \text{ мм}$$

$$\text{Бетон В20, } R_{\text{пр}} = 11.5 \text{ МПа} = 1.15 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}; \quad \text{Нагрузка на базу: } N = 1327.4 \text{ кН};$$

$$\text{Требуемая площадь плиты базы: } A_{\text{пл.тр}} = \frac{N}{y \cdot R_{\text{пр}}} = \frac{1327.4}{1.2 \cdot 1.15} = 962 \text{ см}^2;$$

По ориентировочному значению коэффициента $\gamma = 1.2$ и исходя из необходимых размеров принимаем плиту размером 1250x1250 мм. Принимаем площадь по обрезу: $y = \sqrt[3]{\frac{A_{\text{ф}}}{A_{\text{пл}}}} \Rightarrow A_{\text{ф}} = y^3 \cdot$

$$A_{\text{пл}} = 1.3^3 \cdot 15625 = 34328 \text{ см}^2; \Rightarrow A_{\text{ф}} = 1900 \times 1900 \text{ см} = 36100 \text{ см}^2$$

Определяем напряжения под плитой базы:

$$\sigma_{\text{ф}} = \frac{N}{A_{\text{пл}}} = \frac{1327.4}{15625} = 0.085 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} < y \cdot R = 1.2 \cdot 1.15 = 1.38 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2};$$

Конструируем базу колонны с траверсами толщиной 10 мм и привариваем их к полкам колонны и к плите угловыми швами. Вычисляем изгибающие моменты на разных участках для определения толщины плиты. Аналогично были подобраны сечения III, IV, V, VI (рис. 8).

Вывод. В статье разработаны конструктивные схемы и приёмы, позволяющие уменьшить собственный вес несущих конструкций. Выполнен конкретный пример расчёта большепролетной рамы сплошного сечения с учётом его переменности по пролёту.

Библиографический список:

1. «Металлические конструкции» – под редакцией Ю.И. Кудишина, Москва, Академия, 2008 г.
2. «Металлические конструкции» – под редакцией Е.И. Беленя, Москва, Стройиздат, 1986 г.
3. Беленя Е.Н. Предварительно напряжённые несущие металлические конструкции. – 2-е изд. – Москва, Стройиздат, 1975. – 415 с.
4. Металлические конструкции (специальный курс) – 2-е изд. под редакцией Беленя Е.Н., – Москва, Стройиздат, 1976. – 600 с.
5. Брудка Ян, Лубински Мечислав. Легкие стальные конструкции (перевод с польского). – Москва, Стройиздат, 1974.
6. Металлические конструкции: Справочник проектировщика. 2-е изд. Под редакцией Мельникова М.П. – Москва, Стройиздат, 1980. – 776 с.
7. Справочник конструктора «Стальные конструкции» – под редакцией Шумакова 2004 г.
8. «Основы металлических конструкций» – В.В. Маслов, Волгоград
9. СП 20.13330.2016 Свод правил. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85.
10. СП 16.13330.2017 «Стальные конструкции». М.: Стандартинформ, 2017. АО "НИЦ "Строительство" – ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, 92 с.
11. Справочник конструктора «Стальные конструкции» – под редакцией Шумакова 2004 г.

References:

1. Metal structures – edited by Yu.I. Kudishina, Moscow, Academy, 2008 (In Russ)
2. Metal structures - edited by E.I. Belenya, Moscow, Stroyizdat, 1986(In Russ)
3. Belenya E.N. Prestressed load-bearing metal structures. – 2nd ed. - Moscow, Stroyizdat, 1975; 415 p. (In Russ)
4. Metal structures (special course) - 2nd ed. under the editorship of Belenya E.N., Moscow, Stroyizdat, 1976; 600. (In Russ)
5. Brudka Jan, Lubinski Mechislav. Light steel structures (translated from Polish). Moscow, Stroyizdat, 1974. (In Russ)
6. Metal structures: A designer's guide. 2nd ed. Under the editorship of Melnikov M.P. - Moscow, stroy.izdat. 1980; 776. (In Russ)
7. Handbook of the designer "Steel structures" - edited by Shumakov 2004 (In Russ)
8. "Fundamentals of metal structures" V.V. Maslov, Volgograd (In Russ)
9. SP 20.13330.2016 Code of Practice. Loads and impacts. Updated edition of SNiP 2.01.07-85. (In Russ)
10. SP 16.13330.2017 "Steel structures". M.: Standartinform, JSC "Research Center "Construction" - TsNIISK named after V.A. Kucherenko, 2017; 92. (In Russ)
11. Handbook of the designer "Steel structures" - edited by Shumakov 2004 (In Russ)

Сведения об авторах:

Юсупов Абусупян Курашевич, доктор технических наук, профессор, кафедра «Строительные конструкции и гидротехнические сооружения»; hairulla213@mail.ru

Муселемов Хайрулла Магомедмурадович, кандидат технических наук, доцент, кафедра «Строительные конструкции и гидротехнические сооружения»; hairulla213@mail.ru

Вишталов Раджаб Исабекович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительные конструкции и гидротехнические сооружения»

Information about the authors:

Abusupyan K.Yusupov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Department of Building Structures and Hydraulic Structures; hairulla213@mail.ru

Hairulla M.Muselemov, Cand.Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Department of Building Structures and Hydraulic Structures; hairulla213@mail.ru

Rajab I. Vishtalov, Cand.Sci. (Eng.), Assoc. Prof. Department of Building Structures and Hydrotechnical Structures; hairulla213@mail.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/ Received 12.10.2022.

Одобрена после рецензирования/ Reviced 29.11.2022.

Принята в печать /Accepted for publication 29.11.2022.

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 (2 экз.); распечатка должна представлять собой письменную копию файла статьи; электронную копию (допустима передача по электронной почте); экспертное заключение о возможности опубликования в открытой печати (1 экз.); метаданные авторов: ФИО, место работы, ученое звание, должность (1 экз.);

Правила оформления текста

Текст подготавливается в текстовом редакторе MicrosoftWord. Статья должна предусматривать разделы: «Введение», «Постановка задачи», «Методы исследования», «Обсуждение результатов», «Вывод». Объем непосредственно содержания статьи должен составлять не менее 9 -10 страниц машинописного текста.

Формулы подготавливаются во встроенном редакторе формул MicrosoftWord или в редакторе MathType. Шрифтовое начертание обозначений в формулах, в таблицах и в основном тексте должно быть полностью идентичным. Ссылки на формулы и таблицы даются в круглых скобках, ссылки на использованные источники (литературу) - в квадратных скобках. Формат бумаги А4. Параметры страницы: поля - левое 3 см, верхнее и нижнее 2 см, правое 1,5 см; колонтитулы отсутствуют.

Элементы заглавия публикуемого материала

- УДК
- Перечень авторов (разделяется запятыми, инициалы после фамилий, на русском и английском языке); выравнивание по центру.
- Название статьи (на русском и английском языке).
- Резюме (Abstract) – 200-250 слов, характеризующих содержание статьи (на русском и английском языке).
- Ключевые слова (keywords) 5-10 слов или словосочетаний, отражающих содержание статьи (на русском и английском языке).

Каждый элемент заглавия приводится, начиная с новой строки; выравнивание проводится по центру.

Основной текст Шрифт TimesNewRoman 12 pt, выравнивание по ширине, первая строка с отступом 1,25 см, межстрочный интервал - 1.

Библиографический список

В статье указывается строка с текстом «**Библиографический список**». Библиографический список на русском языке выполняется по ГОСТ Р 7.0.5 -2008.

Библиографический список должен составлять не менее 20 наименований источников литературы, среди которых от 30-70 % ссылок на иностранные источники. Ссылки на неопубликованные работы не допускаются. Обязательно цитирование современных работ, изданных по тематике статьи за последние 5 лет. Доля ссылок на статьи авторов рукописи, изданных ранее, не должна превышать 20% от общего количества ссылок. Библиографический список обязательно должен быть переведен на английский язык. «References» должен быть составлен по стандарту «Ванкувер». Ссылки на материалы, размещенные на электронных носителях, следует допускать в крайнем случае.

Редакция оставляет за собой право потребовать от автора замены ссылки, если на момент обработки статьи по указанному адресу материал будет отсутствовать.

Справка об авторах

Включает для каждого автора фамилию, имя, отчество (полностью), ученую или академическую степень, ученое звание, 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 центру.

ниваются по середине строки, номер заключается в круглые скобки и выравнивается по правому краю текста. Все впервые встречающиеся в формуле обозначения должны быть расшифрованы сразу после формулы.

Верстка рисунков

Рисунки, представляющие собой графики, схемы и т. п., должны быть выполнены в графических векторных редакторах (встроенный редактор Microsoft Word, CorelDraw, Microsoft Visio и т. п.). Использование точечных форматов (.bmp, .jpeg, .tif, .html) допустимо только для рисунков, представление которых в векторных форматах невозможно (фотографии, копии экрана монитора и т. п.). Название рисунка указывается на русском и английском языках.

Верстка таблиц

Таблица состоит из следующих элементов: нумерационного заголовка (слова «Таблица» и ее номера арабскими цифрами); шапки (заголовочной части), включающей заголовки граф (объясняют значение данных в графах); боковика (первой слева графы) и прографки (остальных граф таблицы). Название таблицы указывается на русском и английском языках.

Требования к рецензированию и хранению рецензий научных статей, поступивших в редакцию журнала

Научная статья, поступившая в редакцию журнала, рассматривается ответственным редактором на соответствие тематике и направлениям журнала, правилам оформления и наличие сопроводительных документов. Редакция осуществляет рецензирование всех поступающих в редакцию материалов, с целью их экспертной оценки. Все рецензенты являются признанными специалистами по тематике рецензируемых материалов. Рецензии хранятся в редакции издания в течение 5 лет. При поступлении соответствующего запроса редакция вправе направлять копии рецензий в Министерство науки и высшего образования РФ.

План-график издания журнала

Выпуск 1 (март) – прием статей до 31 декабря предыдущего года; Выпуск 2 (июнь) – прием статей до 31 марта текущего года; Выпуск 3 (сентябрь) – прием статей до 30 июня текущего года; Выпуск 4 (декабрь) – прием статей до 30 сентября текущего года.

Редколлегия оставляет за собой право производить редакционные изменения, не искажающие основное содержание статьи. Статьи, не отвечающие правилам оформления, к рассмотрению не принимаются. Рукописи и электронные носители авторам не возвращаются. Датой поступления считается день получения редколлгией окончательного текста статьи.

Адрес редакционного совета: 367026, РД, г. Махачкала, пр. И. Шамиля, 70, ФГБОУ ВО «ДГТУ», Учебно-лекционный корпус 2, редакция журнала «Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки». Технические вопросы можно выяснить по электронному адресу: vestnik.dgtu@mail.ru и по телефону 8(8722)62-39-64, +79280504268

FORMATTING REQUIREMENTS FOR PAPERS

Electronic copies are used when laying out the journal. Computer processing is used for line and halftone (grayscale) graphics. The journal is produced by offset printing technology. Therefore, the following should be submitted to the editor: a printout of the manuscript (2 copies.); the printout should be a hard copy of the electronic article file; electronic copy (e-mail is acceptable); an expert opinion supporting the article's suitability for publication (1 copy); Information about authors: Name, place of work, academic rank, position.

Guidance for the preparation of texts

The text should be prepared in Microsoft Word. The article must include sections entitled: "**Introduction**", "**Background**", "**Methods**", "**Results and Discussion**", "**Conclusion**". The article itself is supposed to comprise at least 9-10 if typewritten pages. Formulae should be prepared in Microsoft Word's built-in equation editor or MathType. Font symbols used in formulae, tables and in the main text must be completely identical. References to formulae and tables are given in round brackets; references to the sources referred to (literature) – in square brackets.

Paper size – A4. Page setup: margins – left 3 cm, top and bottom – 2 cm, right – 1.5 cm; no headers or footers.

Elements of the title of the published material

- UDC / LBC
- List of authors (separated by commas; initials after surnames; in Russian and English); alignment right.

- Title of the article (in Russian and English).
- Abstract – 200-250 words or characters describing the content of the article (in Russian and English).
- Keywords – 5-10 words or phrases that reflect the content of the article (in Russian and English).

Each title element should start on a new line; aligned centre.

Body text. Font TimesNewRoman 12 pt, full justification, first line with 1.25 cm indentation, line spacing – 1.

Bibliography

The bibliography list should be entitled References. References in Russian prepared according to GOST R 7.0.5 -2008.

The reference list is considered to include at least 20 names of literature sources, including 30–70% of references to foreign sources. References to unpublished works are not permitted. Only recent works on the subject of the article published within the past 5 years should be cited. The proportion of references to articles previously published by the authors should not exceed 20% of the total number of references. The bibliography must be translated into English. "References" should be drawn up according to the "Vancouver" standard. Please indicate your chosen standard when formulating the bibliography. Links to material on electronic media shall be allowed as a last resort. The editors reserve the right to require a replacement reference from the author if an item is absent at a specified address at the time of processing of the article.

Information about authors

For each author, the following information should be provided: first name, middle name (or patronymic) and last name, scientific or academic degree, academic title, brief academic biography (no more than 5-6 lines), name and full address of place of work. The specification of an email address is mandatory.

Composition of formulas

Formulas should be prepared in the built MicrosoftWord equation editor or MathType Editor; only those formulas that are referenced in the text should be numbered; the use of letters or other characters is not permitted when enumerating equations. Formulas written out on a separate line are aligned to the middle of the line; their respective numbers shall be in parentheses and right-aligned. All symbols occurring in the formula for the first time must be decoded immediately after the formula.

Layout of figures

Drawings, consisting of graphs, charts, etc. should be prepared in graphic vector editors (the internal editor of MicrosoftWord, CorelDraw, MicrosoftVisio etc.). The use of bitmap formats (.bmp, .jpeg, .tif) is only permissible for graphics whose presentation is not possible in vector formats (photos, screenshots, etc.).

Layout of tables

A table should consist of the following elements: numerical title (the word "Table" and its number in Arabic numerals); title (header section) including column headings (explaining the meaning of the data in the columns); side heading (the first column on the left) and the table body (the other columns of the table).

Reviewing requirements for and saving of scientific article reviews, received by the journal editorial staff

A scientific article received by the editorial office is considered by the responsible editor in terms of its compliance with topics and directions of the magazine, formatting guidelines and availability of supporting documents. The editorial staff carries out a review of all incoming materials to the editor with a view to peer review. All reviewers are acknowledged experts on the topic of the peer-reviewed material. Reviews are stored at the editorial office for 5 years. On receipt of a proper request, editorial staff have the right to submit copies of reviews to the RF Ministry of Education and Science.

Publication schedule

Issue 1 (March) – articles accepted until 31 December of the previous year; Issue 2 (June) – articles accepted until March 31 of the present year; Issue 3 (September) – articles accepted until 30 June of the present

year; Issue 4 (December) – articles accepted until September 30 of the present year; The Editorial Board reserves the right to make editorial changes which do not distort the main content of the article.

Articles that do not conform to formatting guidelines will not be taken into consideration. Manuscripts and electronic media will not be returned. The date of acceptance shall be deemed to be the date of receipt of the final text by the editorial board. Address of the editorial board: 70 Imama Shamilya Ave., Makhachkala 367026, Daghestan, Russia. Daghestan State Technical University, Tutorial-Lecture Building 2, Editorial Board «Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences». Technical questions can be clarified by e-mail: vestnik.dgtu@mail.ru or by telephone 8 (8722) 62-39-64; +79280504268.

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation



ВЕСТНИК
ДАГЕСТАНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА.
ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ
Махачкала, Том 49– №4 – 2022.

HERALD
OF DAGHESTAN STATE TECHNICAL UNIVERSITY. TECHNICAL SCIENCES
Makhachkala, Volume 49, No.4. 2022.

Верстка: Шагина С.Б.

Перевод: Шагина С.Б.

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: Svetlana B.Shagina

Translation: Svetlana B.Shagina

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 25.12.2022г. Сдано в печать 31.12.2022г.

Формат 60x84 ¹/₈. Гарнитура «Times». Бумага офсетная.

Тираж 500. Усл. п.л. 24,26. Уч. изд.л. 24,12.

Заказ № 1356

Отпечатано в типографии ООО «Издательство «Лотос»
367018. Республика Дагестан, г. Махачкала, пр-кт Петра I, 61.